



# Řízení robotických systémů pomocí signálů povrchového EMG

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B3944 Biomedicínská technika

*Studijní obor:*

Biomedicínská technika

*Autor práce:*

**Filip Zajan**

*Vedoucí práce:*

Ing. Jan Koprnický, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





## Zadání bakalářské práce

# Řízení robotických systémů pomocí signálů povrchového EMG

*Jméno a příjmení:* **Filip Zajan**  
*Osobní číslo:* D18000066  
*Studijní program:* B3944 Biomedicínská technika  
*Studijní obor:* Biomedicínská technika  
*Zadávací katedra:* Fakulta zdravotnických studií  
*Akademický rok:* **2020/2021**



## **Zásady pro vypracování:**

### **Cíle práce:**

1. Seznámit se s fungováním a problematikou robotické ruky Brunel Hand.
2. Zprovoznit řízení ruky pomocí povrchového EMG signálu.
3. Zanalyzovat různé typy snímačů EMG.
4. Naprogramovat a otestovat různé řídicí algoritmy robotické ruky.

### **Teoretická východiska (včetně výstupu z kvalifikační práce):**

V souvislosti s rozvojem nových technologií, 3D tisku a otevřených platforem řídicích systémů, se nachází jejich uplatnění v různých odvětvích. Jedním z těchto odvětví je také aplikace v protetice horních i dolních končetin. Aktivní protetické systémy jsou výsledkem komplexního mezioborového přístupu k řešení problematice. Aplikace zmíněných nových technologií přispívá k zefektivnění vývoje a výroby zařízení, které není možné vyrábět velkosériově. Výsledkem tohoto zefektivnění je mimo jiné přínos ve snížení výrobních nákladů a tím i výsledné ceny zařízení. V Laboratoři bionických rukou se nachází několik modelů robotických končetin, jejichž vývoj, díky otevřeným zdrojovým datům, je možné dále rozvíjet a to v mnoha směrech.

Výsledkem bakalářské práce bude osvojení znalostí z problematiky aktivních protetických náhrad horních končetin, porozumění digitálnímu zpracování biologických signálů (povrchové EMG) a schopnost programování algoritmů řídicích systémů těchto robotických soustav.

### **Výzkumné předpoklady / výzkumné otázky:**

Jaká je odezva řídicího systému ruky na snímání/řídicí signál EMG?

Jaké elektrody EMG lze pro snímání použít?

Jakými signály, kromě EMG, je možné řídit robotické ruce?

### **Metoda:**

Kvalitativní.

### **Technika práce, vyhodnocení dat:**

Programování řídicích systémů, měření elektrických signálů a jejich digitální zpracování.

### **Místo a čas realizace výzkumu:**

Technická univerzita v Liberci, říjen 2020 – březen 2021.

### **Rozsah práce:**

Rozsah bakalářské práce činí 50-70 stran (tzn. 1/3 teoretická část, 2/3 výzkumná část).

### **Forma zpracování kvalifikační práce:**

Tištěná a elektronická.

Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy:  
Forma zpracování práce:  
Jazyk práce:

tištěná/elektronická  
Čeština



### Seznam odborné literatury:

- ARTAL-SEVIL, J. S. et al. 2018. Control of a Bionic Hand using real-time gesture recognition techniques through Leap Motion Controller. *2018 XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference*. 2018(XIII), 1-7. DOI 10.1109/TAE.2018.8476122.
- ČIHÁK, Radomír. *Anatomie. 2. Třetí, upravené a doplněné vydání*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4788-0.
- DUHIG, Holly. 2018. *Bionic Limbs: Science Fiction to Science Fact*. New York: Gareth Stevens Publishing. ISBN 978-1-5382-1381-0.
- HASSAN, H. F., S. J. ABOU-LOUKH a I. K. IBRAHEEM. Teleoperated robotic arm movement using electromyography signal with wearable Myo armband. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2020, 32 (6) DOI: 10.1016/j.jksues.2019.05.001. ISSN 1018-3639.
- KITTNAR, Otomar. *Lékařská fyziologie*. 2. vyd. Praha: Grada, 2020. ISBN 978-80-247-1063-4.
- KOS, Anton a Anton UMEK. *Biomechanical biofeedback systems and applications*. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-331-9913-483.
- LABAT, Karen L. a Karen RYAN. *Human body: A wearable product designer's guide*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis group, 2019. ISBN 978-149-8755-719.
- POPOVIC, Marko B. *Biomechatronics*. Cambridge. Cambridge University Press, 2019. ISBN 978-0-12-812939-5.
- SCHWEITZER, W., M. J. THALI a D. EGGER. Case-study of a user-driven prosthetic arm design: Bionic hand versus customized body-powered technology in a highly demanding work environment. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. 2018, 15(1), 27. DOI 10.1186/s12984-017-0340-0.
- SELECKÝ, Matúš. *Arduino*. Brno. Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.
- WEISS, J. M., L. D. WEISS a J. K. SILVER. *Easy EMG: A Guide to performing nerve conduction studies and electromyography*. 2nd ed. London: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-323-28664-0.

Vedoucí práce:

Ing. Jan Koprnický, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

1. září 2020

Předpokládaný termín odevzdání: 30. června 2021

L.S.

prof. MUDr. Karel Cvachovec, CSc., MBA  
děkan

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

30. června 2021

Filip Zajan

## Anotace v českém jazyce

Jméno a příjmení autora:	Filip Zajan
Instituce:	Technická univerzita v Liberci
Název práce:	Řízení robotických systémů pomocí signálů povrchového EMG
Vedoucí práce:	Ing. Jan Koprnický, Ph.D.
Počet stran:	68
Počet příloh:	12
Rok obhajoby:	2021
Anotace:	<p>Tato bakalářská práce se zabývá problematikou snímání EMG signálů s následným použitím pro robotický systém, kterým je robotická ruka Brunel Hand od firmy Open Bionics.</p> <p>V teoretické části bakalářské práce se zabýváme anatomickou stavbou horní končetiny a její fyziologií. Poté podrobně popisujeme EMG signály a děláme rešerši nejvhodnějších snímačů EMG pro robotickou ruku. Dále se seznamujeme s programem Arduino a knihovnou Beetroot specializovanou pro Brunel Hand. Následně analyzujeme všechny části a komponenty robotické ruky Brunel Hand.</p> <p>V praktické části bakalářské práce se seznámíme s fungováním a schopnostmi robotické ruky Brunel Hand. Zanalyzujeme různé typy EMG snímačů a vybereme nejvhodnější pro robotickou ruku. Následně EMG signál zpracujeme a s jeho pomocí zprovozníme ovládání robotické ruky. Také budeme zkoumat odezvu řídicího systému ruky na snímaný signál EMG. Dále naprogramujeme a otestujeme různé řídicí algoritmy robotické ruky, jejíž součástí bude jednoduchá ukázka chodu a schopností pohybu.</p>
Klíčová slova:	Open bionics, Brunel Hand, Arduino, Chestnut, robotická ruka, MyoWare, EMG snímač

## Annotation

Name and surname:	Filip Zajan
Institution:	Technical University of Liberec
Title:	Robotic system control by surface EMG signals
Supervisor:	Ing. Jan Koprnický, Ph.D.
Pages:	68
Apendix:	12
Year:	2021
Annotation:	<p>This bachelor's thesis deals with the issue of sensing EMG signals and using for a robotic component, which will be a robotic arm Brunel Hand developed by Open Bionics.</p> <p>In the theoretical part of the bachelor thesis we will deal with the anatomical structure of the upper limb and its physiology. Then we will describe the EMG signals in detail and search the best EMG sensors for the robotic arm. We will also get to know the Arduino program and the Betroot library specialized for Brunel Hand. Then we analyze all parts and components of the Brunel Hand robotic arm.</p> <p>In the practical part of the bachelor's thesis we will get to know with the operation and capabilities of the Brunel Hand robotic arm. We will analyze different types of EMG sensors and select the most suitable for the robotic arm. Then we move to process the EMG signal and with its help we will put to control the robotic arm. We will also examine the response of the control system to the sensed EMG signal. We will also program and test various control algorithms of the robotic arm, which will include a simple demonstration of operation and ability to move.</p>
Keywords:	Open Bionics, Brunel Hand, Arduino, Chestnut, robotic arm, MyoWare, EMG sensor

## Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří přispěli ke vzniku tohoto díla, jmenovitě panu Ing. Janu Koprnickému, Ph.D, který se podílel na vedení této práce a pomohl vyřešit problémy při neočekávaných komplikacích, které nastaly. Dále děkuji Filipu Toušovi a Jakubu Zajanovi za pomoc při řešení problémů zdrojového kódu. Ondřeji Zajanovi děkuji za pomoc při výrobě konektorů pro připojení EMG snímače. Poděkování také patří MUDr. Janu Štěpánkovi za cenné informace od firmy Ottobock. Velké díky patří mé rodině za podporu a cenné rady během studia a vypracování práce.

# Obsah

Seznam zkratek . . . . .	11
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2 Teoretická část</b>	<b>14</b>
2.1 Anatomie a fyziologie horní končetiny . . . . .	14
2.1.1 Kosti horní končetiny . . . . .	14
2.1.2 Spojení horní končetiny . . . . .	15
2.1.3 Svaly horní končetiny . . . . .	15
2.1.4 Fyziologie horní končetiny . . . . .	19
2.1.5 Úchop . . . . .	20
2.2 Amputace horní končetiny . . . . .	24
2.3 Protetika . . . . .	25
2.4 Elektrické protézy horních končetin . . . . .	27
2.4.1 Robotické ruce společnosti Ottobock . . . . .	28
2.4.2 Robotické ruce společnosti Touch Bionics . . . . .	29
2.4.3 Robotická ruka společnosti Brain Robotics . . . . .	30
2.4.4 Robotická ruka společnosti exiii . . . . .	31
2.4.5 Robotické ruce společnosti Open Bionics . . . . .	31
2.5 Elektromyografie – EMG . . . . .	37
2.6 Elektrody . . . . .	37
2.7 EMG snímače . . . . .	38
2.7.1 MyoWare Muscle sensor . . . . .	38
2.7.2 MyoBock . . . . .	39
2.7.3 Snímač Touch Bionics . . . . .	39
<b>3 Výzkumná část</b>	<b>40</b>
3.1 Cíle a výzkumné předpoklady . . . . .	40
3.2 Metodika výzkumu . . . . .	40
3.3 Konstrukční a softwarová analýza . . . . .	41
3.4 Analýza výzkumných cílů a výzkumných otázek . . . . .	42
3.4.1 Fungování a problematika robotické ruky Brunel Hand . . . . .	42
3.4.2 Řešení technických problémů . . . . .	43
3.4.3 Úchopové formy Brunel Hand . . . . .	45
3.4.4 MyoWare Muscle Sensor . . . . .	45
3.4.5 Řízení ruky pomocí povrchového EMG signálu . . . . .	46

3.4.6	Elektrody pro MyoWare . . . . .	49
3.4.7	Odezva řídicího systému na EMG signál . . . . .	49
3.5	Diskuze . . . . .	50
3.6	Návrh doporučení pro praxi . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Použitá literatura</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>58</b>
<b>B</b>	<b>Detailní fotodokumentace demontáže Brunel Hand</b>	<b>59</b>
<b>C</b>	<b>Přípevnění EMG snímačů MyoWare</b>	<b>66</b>
<b>D</b>	<b>Zdrojový kód z programu Beetroot</b>	<b>67</b>



## Seznam zkratek

<b>TUL</b>	Technická univerzita v Liberci
<b>FZS</b>	Fakulta zdravotnických studií
<b>FM</b>	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
<b>EMG</b>	Elektromyografie
<b>A/D</b>	Analogově – digitální převodník
<b>IDE</b>	Integrované vývojové prostředí
<b>PWM</b>	Pulzně šířková modulace
<b>NCS</b>	Nervová kondukční studie
<b>PCB</b>	Deska plošných spojů
<b>3D</b>	Trojdimenzionální
<b>PLA</b>	Kyselina polymléčná
<b>NCS</b>	Nervová kondukční studie
<b>I<sup>2</sup>C</b>	Interní integrovaná datová sběrnice
<b>USB</b>	Univerzální sériová sběrnice
<b>SPI</b>	Sériové periferní rozhraní

# 1 Úvod

Tato práce se bude zabývat řízením robotických systémů s pomocí signálů povrchového EMG. Jako robotický systém použijeme robotickou ruku Brunel Hand 1.0. Na světě nalezneme mnoho lidí, kteří by po vážném končetinovém úrazu ocenili efektivní náhradu. Před desítkami let bychom toto téma zařadili do science fiction. Rychlým vývojem moderních technologií se však již dnes objevují prototypy robotických končetin, které se snaží věrně nahradit chybějící část končetiny. Toto téma bude v budoucnosti důležité ve zdravotnictví pro alternativy poúrazových stavů.

Robotické ruce se liší od biologických tím, že se skládají z mechanických a elektrických částí (Duhig, 2018). Robotické ruce, které se snaží co nejvíce napodobit fungování i vzhled robotické ruky specificky nazýváme bionické ruce. Lze je využít jako aktivní protézy nahrazující úchopovou funkci, což budeme v této bakalářské práci řešit. Biologické ruce jsou tvořeny hlavně ze svalů a kostí a pomocí svalové kontrakce mohou vykonat pohyb. U robotických rukou se kosti nahrazují jinou pevnou a odolnou strukturou, která bude sloužit podobně jako opora celé ruky, a za svaly se využívají například takzvané servomotory využívající elektrickou energii ze zdroje. Celý systém robotické ruky řídí výkonný mikrokontrolér, do kterého se přes počítač naprogramuje algoritmus pro pohyb. Propojením svalových stahů na horní končetině (EMG) s mikrokontrolérem může robotická ruka vykonávat určitý pohyb podle potřeby člověka, u kterého tyto signály snímáme.

Robotickou ruku Brunel Hand vytvořili pracovníci a vývojáři ze společnosti Open Bionics. Tato robotická ruka má rozměry podobné biologické ruce a lze ji řídit vnějším zdrojem signálu. Software je volně dostupný (angl. „open source“) a oproti jiným robotickým rukám ji pořídíme za rozdílně nízkou cenu. Nyní tato firma nabízí robotickou ruku Hero Arm, která už slouží jako zdravotnická pomůcka a vznikla právě podle robotické ruky Brunel Hand, ze které se využily osvědčené metody 3D tisku a pohybových algoritmů. Základní strukturu ruky („kostru“) lze vyrobit s pomocí 3D tisku a ostatní komponenty můžeme nalézt na konkrétním internetovém obchodě v odkazu (Open Bionics, 2020).

V naší práci se však nebudeme zabývat 3D tiskem a sestrojením nové robotické ruky, nýbrž naprogramováním a zprovozněním řízení robotické ruky pomocí povrchového EMG signálu na již existující robotické ruce nacházející se v Laboratoři bionických rukou na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií na Technické univerzitě v Liberci (Koprnický, 2020). Chceme se seznámit s filosofií řízení robotických rukou a popsat ji. Zároveň pro snímání EMG signálu zanalyzujeme nejvhodnější typ snímače pro robotickou ruku. Konečným cílem naší bakalářské práce bude otestování a naprogramování různých řídicích algoritmů robotické ruky

reagujících na snímaný EMG signál. V teoretické části provedeme rešerši ohledně anatomie a fyziologie horní končetiny nezbytně nutnou pro výzkumnou část bakalářské práce. Následně si vysvětlíme konkrétní úchopové formy horní končetiny a popíšeme příčiny a typy amputací horní končetiny. Ke správnému pochopení textu je vhodné ho prokládat přiloženými schématy a obrázky.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Anatomie a fyziologie horní končetiny

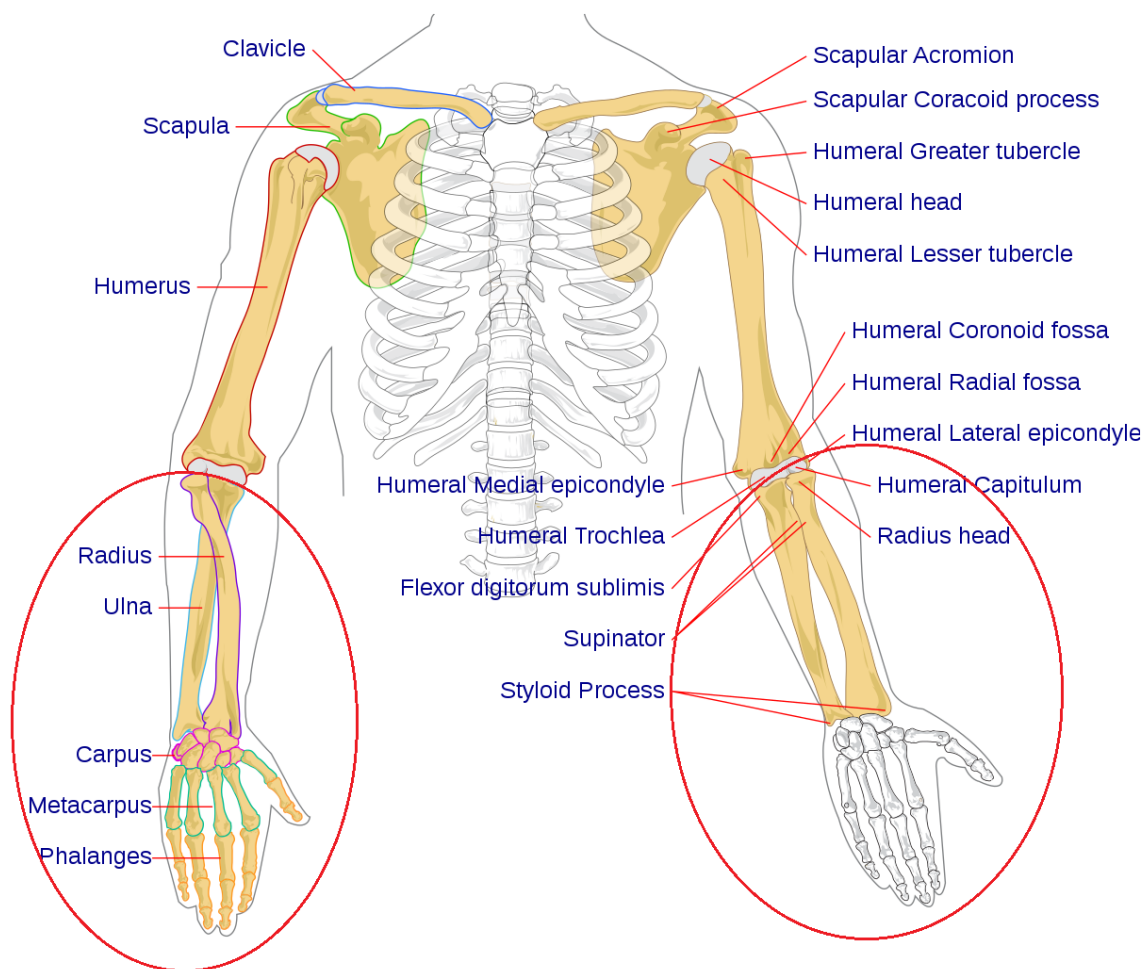
Anatomie je věda zabývající se stavbou lidského těla, o uložení a struktuře jeho částí, o jejich vztazích vzájemných i vůči celému organismu. Zabývá se zdravým organismem, proto bývá občas označována od patologické anatomie jako anatomie normální. Název **anatomie** pochází z řeckého *anatomein*, což znamená rozřezávat (Čihák, 2011).

Fyziologie je oproti anatomii vědou zabývající se funkcemi lidského organismu a opisuje přesně pochody lidského těla (Kittnar, 2020). My se budeme konkrétně zabývat anatomií a fyziologií předloketní části horní končetiny.

#### 2.1.1 Kosti horní končetiny

Kosti horních končetin patří stejně jako dolní končetiny mezi párové kosti. Dělíme je na pletenec (*cingulum*), který připojuje končetinu k osovému skeletu, a volnou končetinu. Jelikož se budeme zabývat rukou hlavně od její předloketní části, podrobné informace o kostech pletence by v této práci přebývaly. Volná končetina se skládá z následujících kostí:

- **Kost pažní (humerus)** – dlouhá kost. Skládá se z kulovité hlavice (proximální epifýzy), zaobleně trojhranného těla (diafýzy) a kloubního konce (proximální epifýzy), ke kterému se připojují kosti vřetenní a loketní.
- **Kost vřetenní (radius)** – předloketní kost na palcové straně (laterálně). Dělí se na hlavici, tělo a distální konec. Tělo je zepředu zploštělé a má podélnou hranu.
- **Kost loketní (ulna)** – předloketní kost na malíkové straně (mediálně). Tvoří ji proximální část, která je uzavřená v loketním kloubu, dále trojhranné tělo a válcovitá hlavice (na distálním konci). Na proximální straně je široká a distálním směrem se zužuje.
- **Kosti ruky (ossa manus)** – zahrnují ji 8 kostí zápěstních (karpálních), 5 kostí záprstních (metakarpálních), 12 článků prstů (palec má pouze dva, ostatní tři) a sesamských kůstek.



Obrázek 2.1: Kostra horní končetiny – nás zajímá zvýrazněná část. Upravený obrázek ze zdroje (Villarreal, 2001).

### 2.1.2 Spojení horní končetiny

Rozlišujeme dvojí spojení kostí: spojení plynulé nebo také nazývané pevné (kosti spojeny vazivem, chrupavkou nebo kostí) a spojení dotykem neboli pohyblivé – kloubem (dotyk styčnými plochami, pouze po obvodu vazivo). U horní končetiny se setkáváme s oběma typy.

- **Spojení volné horní končetiny** – kloub ramenní, kloub loketní, vazivová membrána interossea antebrachii, distální radioulnární kloub, klouby ruky.

### 2.1.3 Svaly horní končetiny

Kosterní svalová tkáň je nezbytně nutná pro pohyb skeletu, ze kterého vytváří aktivní pohybový aparát. Každý sval funguje na principu kontrakce (stahu), který je za normálních okolností vyvoláván nervovým podnětem. Svaly (musculi) jsou základní funkční orgány pohybového aparátu. Šlacha, zvláště uspořádaný pruh tuhého fibrozního vaziva, připojuje sval s kostí, kloubním pouzdem nebo kůží.

Mezi základní složky svalu patří svalová vlákna, jejichž délka a tloušťka je v závislosti na každém svalu individuální. Další složkou je vazivo, které spojuje a obaluje svalová vlákna, ale také vytváří na konci svalu úpony ke kosti (šlachy). Od přibližně 10 vláken se okolo vytváří primární snopeček svalový. Z primárních snopečků jsou vytvořeny malé svaly, u větších svalů se spojují a vznikají sekundární snopce atd. Celý sval pak na konci obaluje tzv. povázka svalová (fascie).

Svaly horní končetiny se dělí ve svaly ramenní a lopatkové, svaly paže, svaly předloktí a svaly ruky. Nás opět zajímají primárně svaly od předloktí:

### **Svaly předloktí (musculi antebrachii)**

- **Pronující sval oblý (musculus pronator teres)** – jde šikmo po předloktí k zevnímu okraji kosti vřetenní. Pronuje předloktí a účastní se také flexe loketního kloubu.
- **Zevní ohýbač zápěstí (musculus flexor carpi radialis)** – vedle pronujícího svalu oblého. Přechází ve štíhlou šlachu a pokračuje skrz tzv. karpální tunel k úponu na 2. metakarp. Funkce je flexe a radiální dukce (pohyb směrem k palci) zápěstí, napomáhá flexi loketního kloubu.
- **Dlouhý sval dlaňový (musculus palmaris longus)** – skládá se ze štíhlého vřeténka bříška a následně šlachy. Směřuje středem předloktí přes vazivové pouzdro karpálního tunelu do dlaně. Tento sval napíná tenkou vazivovou blánu nazývanou palmární aponeuróza, napomáhá také ohýbání loketního kloubu a zápěstí.
- **Vnitřní ohýbač zápěstí (musculus flexor carpi ulnaris)** – sestupuje po loketní straně předloktí. Účastní se flexe zápěstí a flexe loketního kloubu.
- **Povrchový ohýbač prstů (musculus flexor digitorum superficialis)** – nachází se v druhé vrstvě, sestupuje od loketního kloubu po předloktí. Dělí se na 4 složky, jež pokračují jako šlachy do karpálního tunelu a následně do dlaně k 2.–5. prstu. Slouží tedy jako ohýbač interfalangových kloubů prstů. Interfalangové klouby leží distálněji oproti metakarpofalangovým kloubům, které leží více proximálně.
- **Hluboký ohýbač prstů (musculus flexor digitorum profundus)** – sestupuje po vnější straně předloktí pod musculus flexor digitorum superficialis. Také směřuje do karpálního tunelu rozdělen na 4 šlachy, avšak oproti povrchovému flexoru jsou oválné až kulaté. Tyto šlachy jdou také k 2. – 5. prstu. Ohýbá distálnější část interfalangových kloubů prstů.
- **Dlouhý ohýbač palce (musculus flexor pollicis longus)** – jde podél musculus flexor digitorum profundus po vřetenní straně opět do karpálního tunelu a následně do dlaně mezi krátký ohýbač palce (viz dále). Vytváří ohyb v interfalangovém kloubu palce a napomáhá také ohybu metakarpofalangového kloubu palce.

- **Pronující sval čtyřhranný (musculus pronator quadratus)** – od distální čtvrtiny předloktí směřuje šikmo distálně ke kosti vřetenní. Při pronaci působí na distální část skloubení kosti vřetenní a loketní.
- **Sval vřetenní (musculus brachioradialis)** – sestupuje podél vřetenní kosti, v polovině přechází ve štíhlou šlachu. U nataženého a pronovaného předloktí ho supinuje, z krajní supinace pak pronuje. Pomáhá při ohýbání loketního kloubu.
- **Dlouhý zevní natahovač zápěstí (musculus extensor carpi radialis longus)** – podél zevní strany radia přechází na zevní stranu. U zápěstí koná pohyb dorsální flexe a radiální dukce spolu s ostatními svaly.
- **Krátký zevní natahovač zápěstí (musculus extensor carpi radialis brevis)** – dorsálně vedle předchozího svalu. Jeho šlacha na konci je na dorsální straně distálního konce radia v další rýze. Pomáhá dlouhému zevnímu natahovači.
- **Sval supinující (musculus supinator)** – tvoří hlubokou vrstvu postranní skupiny. Rozpíná se od radiálního okraje dolního konce humeru a od začátku ulny zadní částí kolem radia až na jeho přední plochu. Vytáčí kost vřetenní do supinace (pomáhá mu dvojhlavý sval pažní).
- **Natahovač prstů (musculus extensor digitorum)** – Z předloktí přechází na hřbet ruky, dělí se na 4 šlachy, které se na hřbetu oplošťují a rozbíhají k 2.--5. prstu. Jeho funkce je natažení prstů, pomocná pak při dorsální flexi zápěstí.
- **Natahovač malíku (musculus extensor digiti minimi)** – probíhá po okraji loketní kosti po předchozím svalu jako štíhlý sval přecházející ve šlachu a podbíhající na hřbet ruky. Účastní se extenze malíkového prstu a pomáhá mu natahovač prstů, konkrétně tedy pro 5. prst.
- **vnitřní natahovač zápěstí (musculus extensor carpi ulnaris)** – je na předloktí od ostatních svalů nejdále k loketní kosti. Rovněž přechází ve šlachu a směřuje na zápěstí. Koná pohyby, kterými jsou dorsální flexe a ulnární dukce zápěstí spolu s dalšími svaly.
- **Dlouhý odtahovač palce (musculus abductor pollicis longus)** – je hluboký sval sestupující v předloktí šikmo podél radia. Jeho šlacha míří k palci, který abdukuje.
- **Krátký natahovač palce (musculus extensor pollicis brevis)** – probíhá souběžně s dlouhým odtahovačem palce k dlouhé úponové šlaše. Natahuje metakarpofalangový kloub palce.
- **Dlouhý natahovač palce (musculus extensor pollicis longus)** – sestupuje s předchozími svaly na hřbet ruky a jeho šlacha se dostává na hřbetní

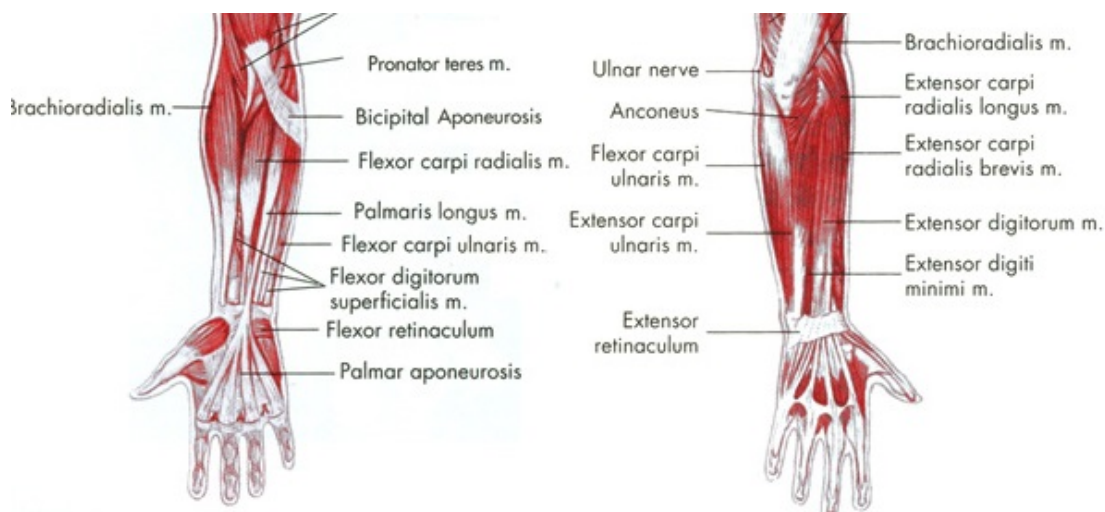
stranu palce. Působí při extenzi palce hlavně v interfalangovém kloubu a podílí se na addukci palce z krajní abdukce.

- **Natahovač ukazováku (musculus extensor indicis)** – podél strany loketní kosti sestupuje a po 2. metakarpu přechází na hřbet ukazováku. Funkcí je extenze ukazováku, ale také extenze zápěstí a ruky.

### **Svaly ruky (musculi manus)**

- **Krátký odtahovač palce (musculus abductor pollicis brevis)** – na zevním okraji palcového valu. Primárně slouží k abdukci palce, napomáhá dlouhému odtahovači palce.
- **Krátký ohýbač palce (musculus flexor pollicis brevis)** – začíná u karpálních kostí a upíná se na proximální článek palce. Vytváří flexi metakarpofalangového kloubu palce, část pomáhá při abdukci a při tzv. fázi opozice palce (úchopová poloha proti ostatním prstům).
- **Oponující sval palce (musculus opponens pollicis)** – má tvar destičky, je kryt oběma předchozími svaly. Staví palec do opozice (spolu s krátkým ohýbačem palce).
- **Přitahovač palce (musculus adductor pollicis)** – upíná se na ulnární sesamkové kůstce a pouzdru metakarpofalangového kloubu palce. Jak jeho jméno napovídá, sval se stahuje při addukci.
- **Svaly hypothenaru (skupina malíková)** – několik svalů: musculus palmaris brevis podkožní sval na fascii hypothenaru – malíková oblast), musculus abductor digiti minimi (odtahovač malíku), musculus flexor digiti minimi brevis (krátký ohýbač malíku) a musculus opponens digiti minimi (oponující sval malíku). Většina svalů plní funkci podle jejich názvu kromě oponujícího svalu malíku, který je spíše přitahovač malíku.
- **Svaly červovité (musculi lumbricales)** – označení podle štíhlého tvaru. Jedná se o 4 svaly začínající na šlachách hlubokého ohýbače prstů. Pokračují podél palcového okraje metakarpofalangových kloubů k 2.–5. prstu. Ohýbají prsty v kloubech metakarpofalangových a extendují v kloubech interfalangových. Pomáhají uklánět prsty k palci (radiálně).
- **Mezikostní svaly (musculi interossei)** – jsou uloženy v prostorech interkarpálních a intermetakarpálních. Rozvírají a svírají vějíř prstů (Čihák, 2011).





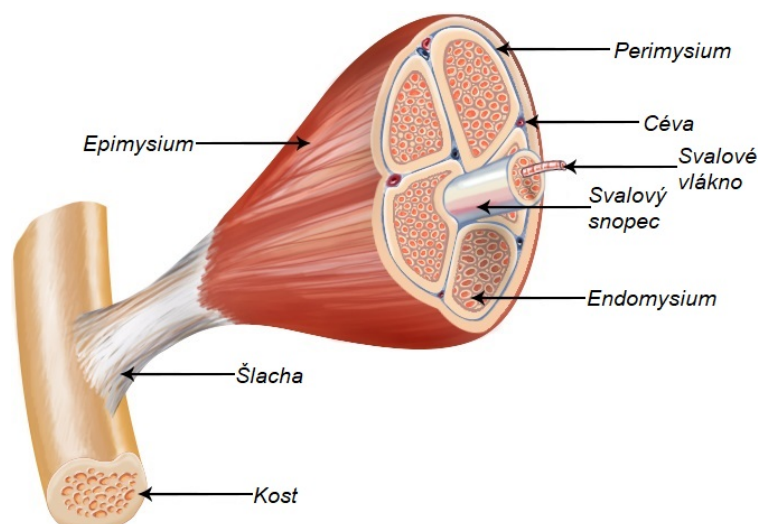
Obrázek 2.2: Svaly horní končetiny distálně od předloktí. Upravený obrázek ze zdroje (Floyd a Thompson, 2015).

Celkem tedy pohyb předloktí a zápěstí ovládá 26 svalů. To je s porovnání s robotickou rukou Brunel Hand více jak 6 větší počet, než počet servomotorů, které robotická ruka k pohybu využívá (viz další kapitola).

#### 2.1.4 Fyziologie horní končetiny

Jak už jsme se zmínili u svalů horní končetiny, základní složkou svalu jsou svalová vlákna. Tato svalová vlákna obsahují až několik tisíc myofibril. Myofibrily se nachází uvnitř podélně se dotýkajících aktinových a myozinových vláken a dalších proteinů. Každá myofibrila obsahuje přibližně 1500 myozinových a 3000 aktinových vláken. Při kontrakci se úseky aktinu a myozinu zkracují a vzájemně překrývají. Příjem nervového vzruchu do svalu zajišťuje nerovně-svalová ploténka. Jedná se o spojení dvou vzrušivých tkání, svalového vlákna a axonu míšního motoneuronu. Z funkčního hlediska jde o chemickou synapsi. Pokud sval kontrahuje proti minimální zátěži, je jeho kontrakce extrémně rychlá, do 100 ms. Rozlišujeme také dva typy kontrakcí: izotonickou a izometrickou. Při izotonické kontrakci se během kontrakce zafixuje síla stahu. U izometrické kontrakce zamezíme svalu, aby se zkracoval – vyvíjí tedy sílu bez zkrácení svalu. Kosterní sval dokáže vyvinout během kontrakce maximálně sílu 30–40 N (3–4 kg) na 1 cm<sup>2</sup> svého průřezu. Pokud bychom teoreticky sečetli maximální kontrakci všech svalů lidského těla, dostaneme se až k síle o velikosti přibližně 220 kN, jak je uvedeno v knize Lékařská fyziologie (Kittnar, 2020).

Co se týče zevních projevů svalové činnosti, musíme rozlišovat mechanické a elektrické projevy svalů. Oba projevy jsou spolu spjaté a jeden má vliv na druhý. Stačí jeden akční potenciál motoneuronu pro vyvolání svalové odpovědi ve formě záškubu, jež je základním prvkem kontrakce. Více takovýchto záškubů zvyšuje sílu a dynamiku svalových skupin. Při vyšší frekvenci akčních potenciálů se však nestíhá sval vracet k počátečnímu klidovému stavu a nové záškuby nasedají na předchozí, čímž vzniká časová sumace a síla kontrakce roste. Tetanickým stahem nazýváme mecha-



Obrázek 2.3: Struktura kosterního svalu. Upravený obrázek ze zdroje (National Cancer Institute, 2020).

nickou odpověď svalu na časovou sumaci. Pokud je požadována malá síla svalu, aktivují se jen malé motorické jednotky pomalou frekvencí kolem 10 Hz. Při vyšší síle se následně aktivují větší motorické jednotky a zvýší se frekvence, která má mimo jiné za následek rychlejší nástup kontrakce.

K polohování a pohybu končetin lidské tělo využívá systém antagonistických a agonistických svalových skupin rozmístěných často v protilehlých stranách kloubů. Věda integrující fyziologické a anatomické principy kosterní svalové tkáně se nazývá kineziologie (Kittnar, 2020). Jednotlivé pohyby, které svaly vykonávají, jsme si již řekli u každého zvlášť. Zde se budeme zabývat komplexním pohybem ruky jako takové.

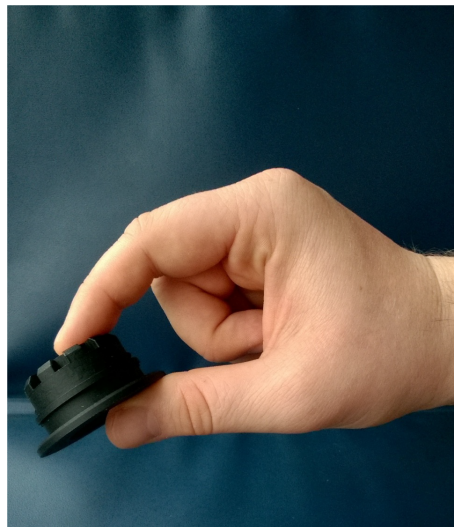
### 2.1.5 Úchop

Úchop patří mezi dominantní funkce ruky, kdy spolupracuje s hmatem a následným pohybem ruky. Důležitou vývojovou změnou lidského člověka je opozice palce. Díky opozici palce můžeme držet v ruce různé předměty a pomocí nich dále můžeme provozovat libovolnou činnost (Hadraba, 2001a).

Úchop můžeme rozdělit do několika skupin: primární, sekundární a terciární. Primární úchop je nejčastější způsob používání horní končetiny u většiny jedinců, kdy slouží účelně k zachycení svého okolí. Následně podle charakteristiky uchopovaného předmětu můžeme rozdělit primární úchopové formy na:

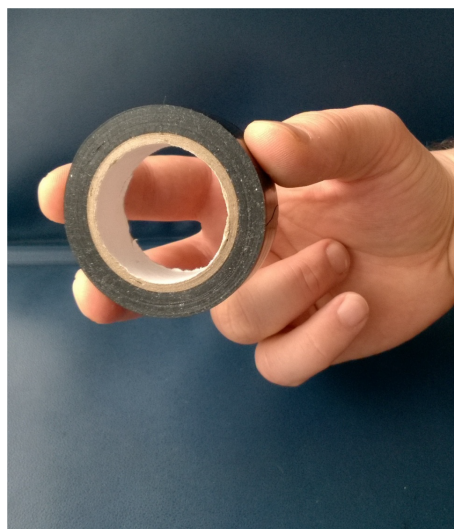
- **Malé úchopové formy** – také bývají označovány jako jemné, nebo špičkové. Patří mezi ně *pinzetový*, *špetkový* a *klíčový*.

Při *pinzetovém úchopu* se stiskne distální část bříška posledního článku některého z prstů v opozici s distální částí bříška posledního článku palce.



Obrázek 2.4: Příklad pinzetového úchopu (Najman, 2017).

*Špetkový úchop* se provádí stisknutím dlaňové strany bříška posledních článků nejčastěji prvních tří prstů, ale také i všech najednou.



Obrázek 2.5: Příklad špetkového úchopu (Najman, 2017).

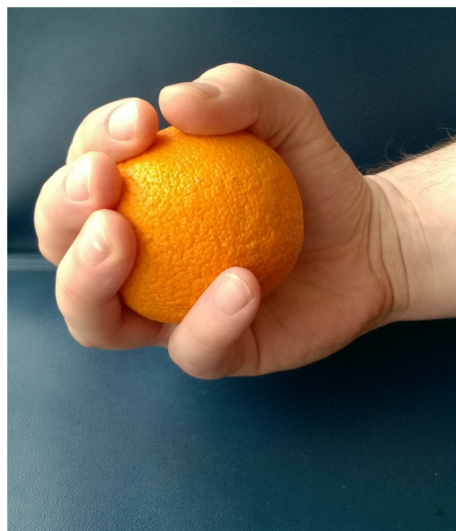
*Klíčový úchop* je prováděn přitisknutím dlaňové části posledního článku palce proti radiální straně ukazováku.



Obrázek 2.6: Příklad klíčového úchopu (Najman, 2017).

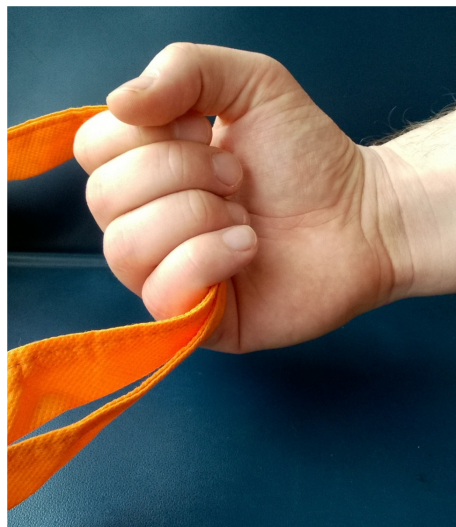
- **Velké úchopové formy** zahrnují: *úchop dlaňový (kulový)*, *úchop háčkový* a *úchop válcový*.

*Dlaňovým úchopem* se rozumí sevření všech prstů směrem do dlaně. Můžeme si to představit, jako když sevřeme v dlani kouli.



Obrázek 2.7: Příklad dlaňového úchopu (Najman, 2017).

*Háčkový úchop* nám vznikne, když se 2.--5. prst ohne v metakarpofalangových a interfalangových kloubech. Palec se na úchopu nepodílí.



Obrázek 2.8: Příklad háčkového úchopu (Najman, 2017).

*Válcový úchop* se chová podobně jako háčkový, avšak zde je palec v opozici proti ostatním prstům a zajišťuje, aby nám předmět nevypadl z ruky.



Obrázek 2.9: Příklad válcového úchopu (Najman, 2017).

Sekundární skupina úchopu se zabývá patologickými jevy předchozích úchopových forem. Terciární skupina úchopu se dále zabývá už defektem části nebo celé ruky.



## 2.2 Amputace horní končetiny

Amputace se definuje jako chirurgické nebo traumatické odstranění periferní části těla, nejčastěji končetiny, vedoucí ke kosmetické nebo funkční změně operované části. Hlavním cílem záměrné (chirurgické) amputace je za účelem zlepšení zdravotního stavu pacienta, záchrany co největší části končetiny nebo dokonce záchrany života.

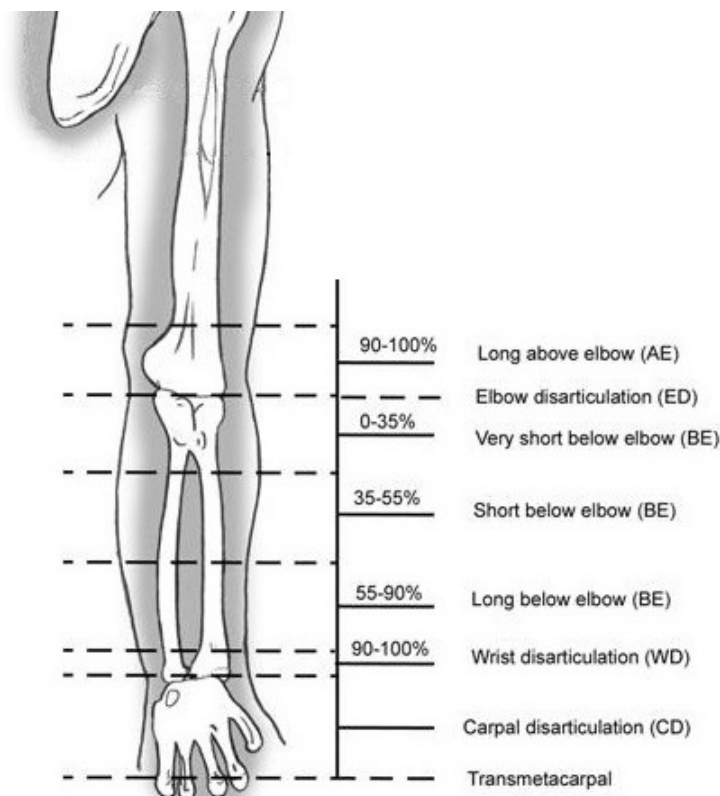
Exartikulace může připomínat amputaci, avšak periferie je odstraněna v linii kloubu. Dále resekce se týká odstranění pouze měkkých tkání, přičemž defekt lze lokálně nahradit. Nicméně tyto termíny mají k sobě velmi blízko.

Musíme také zmínit, že po amputaci se okolní svalstvo namáhá několikanásobně více. Pro pacienta to tedy může být zpočátku velmi fyzicky náročné (Dunzl, 2014).

### Typy amputací horní končetiny

Většinou, pokud je to možno, se amputuje končetina přímo v kloubu, což se nazývá tzv. exartikulace. Rozlišujeme několik typů amputací horní končetiny:

- **Intertorakoskapulární amputace** – nejrozsáhlejší amputace i s pletencem horní končetiny. Nezbývá pahýl.
- **Exartikulace v humeroskapulárním kloubu** – odstranění celého humeru bez pletence. Nezbývá pahýl.
- **Amputace v paži** – zbývá pahýl: krátký, střední, dlouhý.
- **Exartikulace v lokti** – odstranění ulny a radia.
- **Amputace s předloketním pahýlem** – krátký, střední, dlouhý. Při amputaci v dlouhý pahýl můžeme podélně rozdělit kost loketní od vřetenní a vytvořit jakési klepeto, kterým lze uchopit předměty. Tento chirurgický zákrok se také nazývá Krukenbergova operace.
- **Exartikulace v zápěstí** – horní končetina zakončena ulnou a radiem.
- **Amputace v oblasti ruky** – karpální a transmetakarpální exartikulace (Sosna et al., 2001).



Obrázek 2.10: Úrovně amputace horní končetiny, od amputace v paži na dlouhý pahýl až po transmetakarpální exartikulaci. Upravený obrázek ze zdroje (Edwards a Panchbhavi, 2019).

Hlavně se snažíme se nahradit nedostatečné defektní části technickým doplňkem ve formě ortézy nebo při úplné nevyužitelnosti ruky protézou a jinou možnou náhradou (Hadraba, 2001b).

## 2.3 Protetika

Protetika se zabývá náhradami ztracených částí těla ve formě tzv. protéz a snaží se nahradit jejich funkci technickými prostředky. Chybějící končetiny nahrazují ekto-protézy, které se oproti endoprotézám neimplantují chirurgicky do těla, ale jsou aplikované na povrch těla (Sosna et al., 2001). Avšak Funkční náhrada není nikdy stejně efektivní jako původní končetina, jelikož je velmi obtížné a zatím nemožné nahradit složité fyziologické procesy živých tkání. Efektivita náhrady závisí samozřejmě na technické dokonalosti, ale také na stavu zachovalé části končetiny a celkovém fyzickém a psychickém stavu pacienta. Některé protézy mohou sloužit pouze jako kosmetická náhrada, tzv. epitézy, mezi které patří například některé články prstů apod. Přesto, že nemají epitézy funkční význam, mají velký pozitivní vliv na psychiku pacienta.

Většinu protéz tvoří pahýlová objímka nasedající na pahýl končetiny, díl nahrazující chybějící část a koncový díl (chodidlo, ruka). Zatímco protézy dolní končetiny zastupují nosnou funkci, protézy horní končetiny kompenzují úchopovou funkci, čímž se v této bakalářské práci budeme zabývat.

Protézy horní končetiny se dělí na:

- **Protézy pasivní (kosmetické)** – uplatňují se při amputacích distálně od zápěstí. Patří sem již zmiňované epitézy, ale také všechny protézy, které mají pevnou formu bez funkce pohybu. Dříve bychom považovali za pasivní protézu například hák na ruce, ten se ale v dnešní době už příliš nevyskytuje.



Obrázek 2.11: Příklad pasivní protézy předloktí, sloužící jako kosmetická náhrada (Vařečka, 2016).

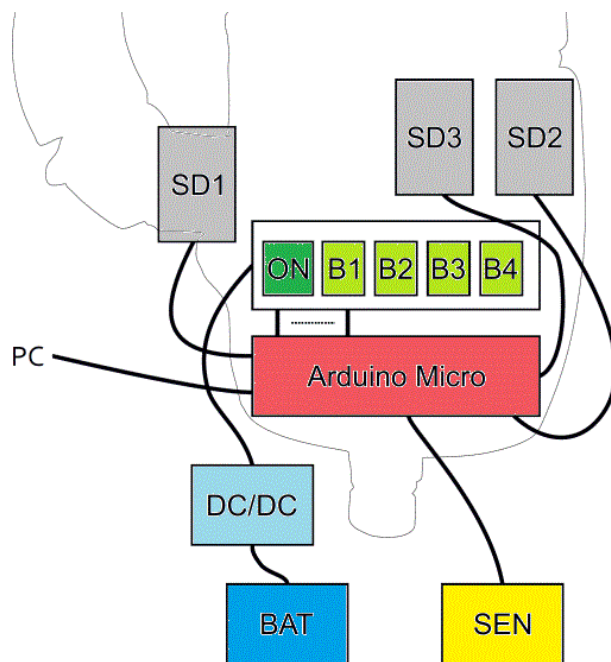
- **Protézy aktivně ovládané vlastní silou** – fungují na principu přenesení pohybu ze zbylé části končetiny na aktivní část protézy pomocí tahového lanka. U amputací v předloktí lze přenést rotační pohyb předloketního pahýlu na extenzi a flexi mechanické ruky.



Obrázek 2.12: Protéza aktivně ovládaná vlastní silou. Upravený obrázek ze zdroje (Ottobock, 2021a).



- **Protézy aktivně ovládané zevním zdrojem energie (elektrické protézy)** – do tohoto druhu protéz řadíme také spoustu robotických rukou, a proto se tímto druhem protéz budeme dále zabývat podrobněji. Kromě pahýlového lůžka a dílu nahrazujícího chybějící část končetiny obsahuje navíc elektromechanickou ruku se zdrojem energie, elektronickým obvodem, elektromotory a snímacími elektrodami, které snímají elektrický potenciál dvou svalových antagonistických skupin. Při kontrakci dané skupiny svalů se pohybuje ruka podle toho, jak je naprogramována (Koudela, 2004).



Obrázek 2.13: Blokové schéma robotické ruky Hackberry od společnosti exiii Inc. SD – servomotory; B1–B4 – tlačítka změny úchopu; SEN – připojený EMG snímač  
Upravený obrázek ze zdroje (Koprnický, Najman a Šafka, 2017).

Skupinu protéz, které využívají ke svému pohybu svalové vzruchy, nazýváme myoprotézy (Sosna et al., 2001). Jak už jsme zmínili v úvodu, protézy, které se snaží vypadat a fungovat jako biologické ruce, považujeme odborněji za bionické ruce. Tím se odlišují od ostatních například tříprstých elektrických protéz a různých přípravků usnadňující manipulaci s předměty.

## 2.4 Elektrické protézy horních končetin

Existuje několik společností, které se zabývají výzkumem a výrobou robotických rukou. Uvedeme zde nejprve několik komerčních protéz volně dostupných na trhu a poté protéz určených pro vědeckou činnost.

### 2.4.1 Robotické ruce společnosti Ottobock

Firma Ottobock je jedním z předních výrobců protéz, ortéz a invalidních vozíků. Mezi nejzajímavější produkty této společnosti patří tzv. bionická ruka Bebionic Hand, ale také Michelangelo (viz obrázek 2.14 a 2.15). Jak jsme již zmínili v úvodu, bionické ruce jsou konkrétní druhy myoprotéz snažící se působit co nejvíce jako přirozené biologické ruce (Ottobock., 2021b). Na obě robotické ruce lze nasadit kosmetické rukavice. Tyto dvě myoprotézy se zastávají na pozicích nejlepších z nejpřirozeněji vypadajících a nejlépe ovladatelných vícekloubných protéz.



Obrázek 2.14: Bionická ruka BeBionic od firmy Ottobock (Ottobock., 2021d).

Pro ruku Michelangelo je charakteristická komplexní kinematika úchopu. Ruku si může uživatel personalizovat přes rozhraní Bluetooth pomocí softwaru AxonSoft. Ruka se řídí speciálním technologicky optimalizovaným systémem Axon Bus. Její hmotnost činí přibližně 420 g, což je v oblasti robotických rukou celkem málo. Pro srovnání lidská ruka váží přibližně 700 g. V ruce zajišťují úchopový pohyb palec, ukazovák a prostředník, přičemž prsteník a malík se pohybují pasivně. Michelangelo disponuje také možností přepnutí režimu zápěstí na pevný, nebo flexibilní stisknutím tlačítka na palcové straně zápěstí. Díky tomu se ruce zvyšuje rozsah volnosti pohybů (Ottobock., 2021e). Pro Bebionic Hand existuje několik variant zápěstí a velikostí robotické ruky podle potřeby uživatele. Bebionic nabízí 11 různých úchopů a gest, které si pomocí tlačítka na hřbetě ruky uživatel může vybrat podle své potřeby (Ottobock., 2021c). Tyto robotické ruce můžeme pořídit volně na trhu, zaplatíme za ně však i více než 21 000 eur.



Obrázek 2.15: Bionická protéza Michelangelo od firmy Ottobock (Ottobock., 2021e).

#### 2.4.2 Robotické ruce společnosti Touch Bionics

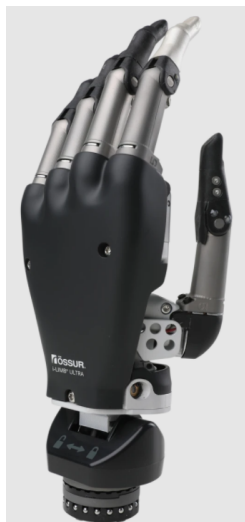
Ze společnosti Touch Bionics vybereme dvě pro nás nejzajímavější robotické ruce, i-Limb Ultra titan a i-Digits Access. Robotické končetiny lze uživatelsky nastavovat přes mobilní aplikaci Biosim nebo My i-Limb.

I-Digits Access je myoelektrická protetická pomůcka vhodná při absenci prstů a palce od metakarpofalangeálního kloubu. Má k dispozici celkem 12 úchopů a gest a každý prst se pohybuje nezávisle na ostatních (Össur, 2021a).



Obrázek 2.16: Robotická ruka i-Digits Access od společnosti Touch Bionics (Össur, 2021a).

I-Limb Ultra titan je vhodná při ztrátě celé ruky. Má robustní konstrukci zpevněnou titanem, díky kterému má ruka už vyšší nosnost. Dotykem ikony Quick Grips si můžeme zvolit daný úchop z celkových 18. Obsahuje mimo jiné bezpečnostní funkci Auto-Grasp proti pádu předmětů pro větší jistotu. Je k dispozici také ve třech velikostech (Össur, 2021b).



Obrázek 2.17: Robotická ruka i-Limb Access od společnosti Touch Bionics (Össur, 2021b).

### 2.4.3 Robotická ruka společnosti Brain Robotics

Společnost Brain Robotics se oproti jiným myoprotézám pyšní pokročilejšími algoritmy rozpoznávání vzorů. Využívá dvoukanálové snímače EMG umístěné na předloktí a pomocí umělé inteligence analyzuje pohybový záměr uživatele. Tímto způsobem si může každý uživatel vytvořit vlastní jedinečný model pohybu a lze tak dosáhnout lepší kontroly nad robotickou rukou. Celkem systém obsahuje 24 předprogramovaných gest.



Obrázek 2.18: Robotická ruka od společnosti Brain Robotics (Brain Robotics, 2021).

#### 2.4.4 Robotická ruka společnosti exiii

Robotická ruka Hackberry od společnosti exiii Inc., viz odkaz (Exiii, 2015), disponuje open source softwarem a 3D vytisknutou konstrukcí. Hackberry se řídí technologií Arduino Micro a můžeme ji ovládat podobně jako myoelektrické porotézy pomocí snímání EMG signálů nebo pomocí tlačítek na ruce. Tato robotická ruka se využívá hlavně ve vědecké činnosti pro vývoj myoprotéz. Více se můžeme dozvědět v článku (Koprnický, Najman a Šafka, 2017).



Obrázek 2.19: Robotická ruka Hackberry od společnosti exiii Inc. (Exiii, 2015).

#### 2.4.5 Robotické ruce společnosti Open Bionics

Robotické ruce od Open Bionics jsou už celkem 4, přičemž všechny využívají technologie 3D tisku. První se vytvořila ruka Ada Hand, která jako prvotní verze byla navržena tak, aby se snadno stavěla a opravovala. Ada Hand disponuje 4 servomotory pro každý prst a lze na ní spolehlivě programovat různé úchopové formy pro výzkumné účely (Bionics, 2016).



Obrázek 2.20: Robotická ruka Ada Hand od společnosti Open Bionics.  
Upravený Obrázek z zdroje (Bionics, 2016).

Nejnovější typ robotické ruky od Open Bionics je Hero Arm, tudíž celá paže. Vychází ze znalostí získaných při vývoji předešlých robotických rukou. Každá vyrobená robotická paže je navržena subjektivně pro každého zvlášť a následně vytisknuta pomocí 3D tisku. Jako materiál se využívá tzv. Tvrdý nylon 12. Uvnitř lůžka se nachází speciální EMG snímače. Využívá tzv. proporcionálního snímání signálů pro lepší ovládání. V současnosti se jedná o nejlehčí robotickou paži na trhu. Zároveň dokáže uzvednout až 8 kg. Oproti konkurenci je cena Hero Arm méně než poloviční (Bionics, 2021a). Jeden z typů Hero Arm můžeme vidět na obrázku 2.21.



Obrázek 2.21: Bionická ruka Hero Arm od společnosti Open Bionics (Open Bionics, 2021a).

### Brunel Hand

V pořadí je Brunel Hand druhá ruka vytvořená po Ada Hand (Open Bionics, 2020). Důležité je zmínit, že se nejedná se o lékařský přístroj nebo zařízení, nýbrž vědeckou technologii určenou pro výzkum. Veliká výhoda Brunel Hand spočívá díky její 3D tiskem vyrobené konstrukci a nízké hmotnosti 371 g. Konstrukce je však i přesto robustní. Rozměry Brunel Hand jsou  $198 \times 127 \times 66$  mm, čímž se blíží biologické ruce, což je  $193 \times 114 \times 89$  mm (Čihák, 2011). V 3D tisku se využívají plastové materiály jako kyselina polymléčná (PLA) a různé druhy polyuretanu. Pro lepší uchopení předmětů obsahují vnitřní části prstů a dlaň přilnavé gumové podložky právě z polyuretanu.

Open Bionics následně vytvořilo další verzi Brunel Hand 2.0, která se od předešlé verze liší hlavně konstrukčními úpravami pro lepší a přístupnost odolnost (Open Bionics, 2020).

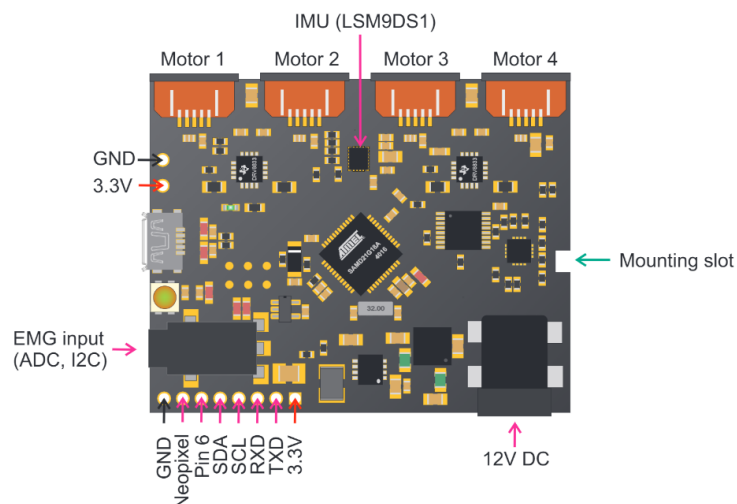
Robotická ruka má 9 stupňů volnosti a 4 servomotory, přičemž malík a prsteník je ovládán pouze jedním servomotorem. Při uchopení předmětu servomotory mimo jiné reagují na odezvu ve formě reakční síly. Ruka pracuje při napětí 6–12 V (Open Bionics, 2020).



Obrázek 2.22: Robotická ruka Brunel Hand 2.0 od společnosti Open Bionics (Open Bionics, 2020).

## Arduino

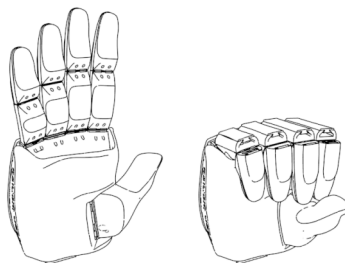
Celý systém robotické ruky Brunel Hand ovládá řídicí jednotka PCB Chestnut s procesorem Atmel Arm Cortex M0+. Tato řídicí jednotka navržená společností Open Bionics je velmi podobná desce Arduino UNO. Ruku můžeme ovládat z jiného zařízení, například stolního počítače, nebo lze ruku ovládat s pomocí EMG signálu. Samotný mikrokontrolér nepřichází s ničím novým, je však nejvhodnější volbou k rychlému vytváření prototypů a proof-of-concept řešení, čehož využívá právě projekt robotické ruky Brunel Hand. Výhody tohoto mikrokontroléru jsou hlavně v jeho nízké ceně, snadné implementaci a otevřenému vývojářskému prostředí. Na relativně jednoduché vývojářské platformě Arduino IDE právě nejlépe pochopíme řízení robotických systémů a robotických rukou (Open Bionics, 2020).



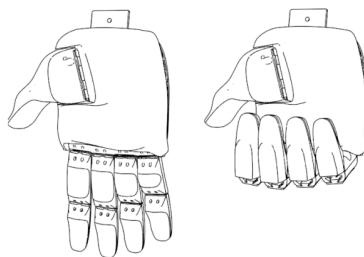
Obrázek 2.23: Řídicí jednotka Chestnut z robotické ruky Brunel Hand. Další informace můžeme nalézt v katalogu (Open Bionics, 2021b).

## Polohy Brunel Hand

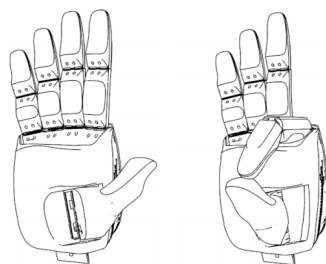
Brunel Hand dokáže vykonat celkem 5 poloh, fist grip, palm grip, pinch grip a tripod grip. Úmyslně jsme je nenazvali úchopy, jelikož se u některých nejedná o úchop jako takový, ale například pouze o gesto atd. Další gesto nebo úchop si lze naprogramovat, zde jsou však ty nejvíce užitečné. Více se můžeme dočíst v technické dokumentaci (Simons, 2020).



Obrázek 2.24: **Fist grip** – ruka sevřena v pěst. Lze považovat za dlaňový nebo válcový úchop, záleží na předmětu. Možné zatížení i více jak 5 kg, užitečné 2,2 kg. (Simons, 2020).

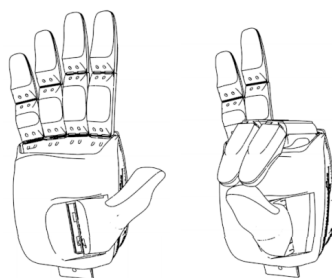


Obrázek 2.25: **Palm grip** – podobné jako fist grip ale bez účasti palce. Uplatňuje se jako háčkový úchop. Může také sloužit jako gesto palce zdviženého nahoru. Možné zatížení i více jak 8 kg (Simons, 2020).

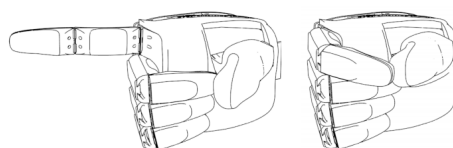


Obrázek 2.26: **Pinch grip** – pinzetový úchop. Dokáže udržet malý objekt o hmotnosti 0,4 kg a větší objekt o hmotnosti 2 kg (Simons, 2020).





Obrázek 2.27: **Tripod grip** – špetkový úchop. Udrží malý objekt 0,1 kg těžký, větší objekt pak do hmotnosti 1 kg (Simons, 2020).



Obrázek 2.28: **Point gesture** – gesto ukazováku. Ukazovák se jediný natahuje a ostatní prsty se uzavírají (Simons, 2020).

## Software

Software řídí hardware a můžeme ho považovat za jakýsi mozek celého zařízení. Kvalita softwaru je důležitá pro správnou, efektivní a stabilní funkcionalitu. Platforma Chestnut využívá tzv. Arduino IDE, neboli integrovaného vývojového prostředí. Lze ho považovat za prostředí, kde se náš nápad převádí do programového kódu.

Programový kód se následně musí zkompileovat do jiného formátu, který je pro mikrokontrolér srozumitelný. Kompilátor by se dal označit za jakýsi překladač. Následně se vygenerovaný přeložený soubor nahraje do paměti mikrokontroléru.

Nadstavbou kompilátoru je preprocesor, jehož příkazy se značí znakem „#”. Využívá se pro definování jednotlivých vstupů a výstupů, kterými daná deska disponuje. Můžeme tak vytvořit univerzálnější kód pro více druhů desek, které mohou mít jiné nebo jinak definované vstupy a výstupy.

## Hardware

Zařízení obsahuje sběrnici **I<sup>2</sup>C** nebo **SPI** (serial peripheral interface). Sběrnice se od sebe liší svými technickými parametry. K mikrokontroléru je dostupných mnoho externích součástí (periferií), pro naši práci budou dostačující následující:

- **Senzory** – slouží ke snímání fyzikálních veličin a převedením na elektrický signál pro zpracování v mikroprocesoru. O konkrétních senzorech se zmíníme dále.
- **Pohony** – mění elektrickou energii na mechanickou, pohyb. Mohou být použity i jako tzv. aktuátory, někdy i jako snímače, protože je mohou obsahovat, jak se píše v odborné literatuře (Selecký, 2016).

## Řídicí systém

Od kvalitního řídicího systému se odvíjí i kvalita zpracování pohybů robotické ruky. Je nezbytný pro zpracování dat. Pro udržování daného pohybu, fyzikální veličiny apod. potřebujeme tzv. regulátor. Podle definice je regulátor zařízení působící prostřednictvím akčního členu na regulovanou soustavu tak, aby se regulovaná veličina udržovala v předepsané hodnotě. Regulační obvod tvoří dva hlavní prvky: regulovanou soustavu a regulátor.

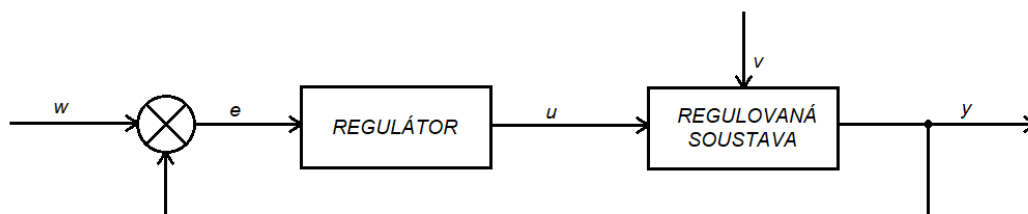
### Akční členy (aktuátory)

Akční členy elektrických regulátorů tvoří servomotory, nebo elektromagnety. Výhodou jsou dobré regulační vlastnosti, malé rozměry, nízká hmotnost, vysoká energetická účinnost a spolehlivost.

### Zpětná vazba

Zpětná vazba vzniká vedením výstupní veličiny zpět na vstup, kde se přičítá nebo odečítá od vstupního signálu. U regulačních obvodů se využívá záporná zpětná vazba, kde odečteme výstupní signál od vstupního signálu nebo žádané hodnoty a vznikne tzv. regulační odchylka, kterou právě regulátor zpracovává, odstraňuje tuto odchylku a snaží se dosáhnout shody vstupní a výstupní veličiny.

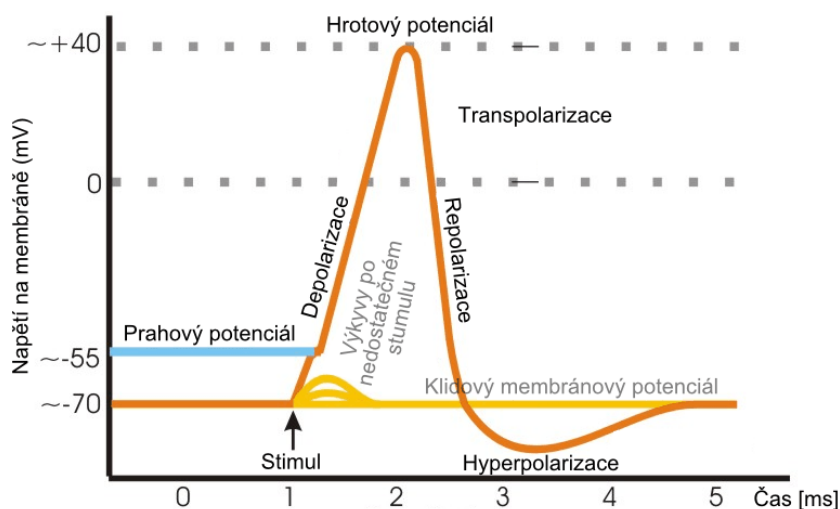
U robotické ruky se zpětná vazba realizuje uživatelem, konkrétně okem. Například při uchycení předmětu už nebude dále vysílat signál pro sepnutí prstů ruky, jelikož při přijetí signálu ruka sepne a už nepotřebuje delší interval signálu apod.



Obrázek 2.29: Blokové schéma obecného zpětnovazebního regulačního obvodu.  $w$  – žádaná veličina;  $e$  – regulační odchylka;  $y$  – regulovaná veličina;  $v$  – poruchová veličina (vnější vliv);  $u$  – akční veličina.

## 2.5 Elektromyografie – EMG

Elektromyografie, neboli EMG, je obor zabývající se záznamy a elektrickými projevy svalové kontrakce. Pomocí elektrod umístěných na kůži se zaznamenává elektrický potenciál svalových vláken, kde probíhá depolarizace a následná repolarizace, čímž vznikne napěťový signál, který nazýváme akční potenciál. Existuje i způsob snímání pomocí jehlových elektrod, ale ty pro náš výzkum nebudeme uvažovat. Výsledkem elektromyografického vyšetření je elektromyogram, také nazývaný EMG křivka (Kittnar, 2020). Právě pomocí snímání EMG signálu můžeme vyvolat pohyb robotické ruky. Pro snímání EMG signálu se používají 3 povrchové elektrody: aktivní (stimulační), referenční (záznamové), a zemní. Dále akční potenciály dělíme na motorické a senzorické (J. Weiss, L. Weiss a Silver, 2016).



Obrázek 2.30: Křivka ideálního akčního potenciálu (Wikipedia contributors, 2005).

Nezpracovaný EMG signál má maximální napětí 0–2 mV a frekvenci 0–1000 Hz, přičemž frekvence s užitečnou informací leží mezi 20–500 Hz. Přesné změření EMG signálu také závisí na charakteristikách elektrod, konstrukci zesilovače a kvalitě A/D převodníku (Hassan, Abou-Loukh a Ibraheem, 2019).

## 2.6 Elektrody

Rozlišujeme dva typy elektrod – povrchové a jehlové. Pro nás bude postačující fakt, že jehlové jsou invazivní, snímají přesněji daný sval a nedochází k rušení okolními svaly. Využívají se ve speciálních případech.

Ve výzkumné části využijeme elektrody povrchové, které se pro snímání EMG signálů používají nejčastěji. Mohou být kruhové (angl. „ring”) nebo diskové, ale také jednorázové, nebo na více použití. Jako materiál se používá nerezová ocel, stříbro nebo zřídka zlato. Jednorázové elektrody mají přilnavou spodní stranu s gelovým

elektrolytickým materiálem uvnitř a lepí se přímo na kůži. U elektrod na více použití je nutné použít vodivý gel, abychom snížili impedanci a omezili vznik artefaktů (J. Weiss, L. Weiss a Silver, 2016). Pokožka má velmi nepravidelnou strukturu, obsahuje vlasové folikuly a její impedance je za suchého prostředí velmi vysoká. Také se využívají tzv. suché elektrody, které nevyžadují pro propojení vodivý gel (Hassan, Abou-Loukh a Ibraheem, 2019).

## 2.7 EMG snímače

EMG snímač měří malé elektrické signály generované svaly při jejich stažení. Obvykle EMG snímač disponuje i filtry pro odstranění šumu a zesilovačem. Z EMG snímače dostaneme EMG signál, který můžeme využít například k ovládání elektronických zařízení (Studio, 2021).

### 2.7.1 MyoWare Muscle sensor

Tento snímač, který vyrobila firma Advancer Technologies, řadíme mezi jeden z nejdostupnějších a nejlevnějších. Velikost výstupního napětí závisí na velikosti svalové aktivity, ale také na velikosti napájecího napětí ze zdroje. Je obecně známo, že ze zesilovače nemůžeme získat větší napětí, než které do něj přivádíme. EMG snímač MyoWare může být napájen jedním zdrojem z vývojářské desky, tudíž nepotřebujeme více zdrojů napětí. Celkem snímač může čerpat signál ze 3 elektrod, přičemž 2 konektory na elektrody jsou přímo na snímači a 3. je prodloužena kabelem (Advancer Technologies, 2016).



Obrázek 2.31: Snímač EMG – MyoWare od společnosti Advancer Technologies (Advancer Technologies, 2016).

### 2.7.2 MyoBock

Tento snímač od společnosti Ottobock pochopitelně využívá hlavně společnost Ottobock ve svých vlastních modelech robotických rukou. Tento snímač je vysoce citlivý na příchozí signál, ale zároveň velmi málo citlivý na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční rušení a šumy. Tento snímač nepotřebuje nalepovací elektrody, jelikož má v sobě integrované povrchové přikládací elektrody, které jsou vyrobeny z titanu. Díky tomu je vhodný i pro pokožku citlivou na podráždění nebo pro alergiky. Snímač má specifický konektor pro připojení do robotické ruky od Ottobock ze kterého je napájen napětím 4,8–7,2 V. Na těle snímače lze nastavit intenzitu snímání EMG signálu 1–7 (Ottobock, 2019).



Obrázek 2.32: Snímač MyoBock od společnosti MyoBock. (Ottobock, 2019).

### 2.7.3 Snímač Touch Bionics

Tento snímač opět jako Myobock vyrobila společnost Touch Bionics pro své účely robotických rukou. Vzhledově se velmi podobá snímači MyoBock (také má integrované kontaktní elektrody) a také má svůj specifický konektor. Existuje i verze s externími pozlacenými elektrodami a kabeláží. Celý snímač lze ještě nastavit v softwaru robotické ruky Biosim (ÖSSUR, 2019).

Co se týče ostatních komerčních robotických rukou a jejich EMG snímačů, nejsou bohužel přesně k dohledání konkrétní snímače z důvodu firemního tajemství. Nicméně většina z nich funguje na podobném principu a tyto jsou pro představu funkce dostačující.

## 3 Výzkumná část

### 3.1 Cíle a výzkumné předpoklady

Mezi cíle bakalářské práce patří:

1. Seznámit se s fungováním a problematikou robotické ruky Brunel Hand.
2. Zprovoznit řízení ruky pomocí povrchového EMG signálu.
3. Zanalyzovat různé typy snímačů EMG.
4. Naprogramovat a otestovat různé řídicí algoritmy robotické ruky.

Výzkumné otázky:

1. Jaká je odezva řídicího systému ruky na snímaný řídicí signál EMG?
2. Jaké elektrody lze pro snímání použít?
3. Jakými signály, kromě EMG, je možné řídit robotické ruce?

### 3.2 Metodika výzkumu

Výzkum byl z důvodu pandemie koronaviru proveden v místě trvalého bydliště později 1. 3. – 30. 6. 2021. Robotická ruka Brunel Hand byla pro tuto práci smluvně zapůjčena z laboratoře bionických rukou na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií na Technické univerzitě v Liberci.

Ze všeho nejdříve bylo nutné pochopit fungování mikrokontroléru, který ovládá robotickou ruku. Nejprve jsme se seznamovali s knihovnou a programem Beetroot vytvořeného společností Open Bionics. Následně jsme ovládali robotickou ruku přes počítač a otestovali různé řídicí algoritmy. Poté jsme vybrali EMG snímač nejvhodnější pro robotickou ruku, připojili ho a naprogramovali jako další možnost ovládání.

### 3.3 Konstrukční a softwarová analýza

Analyzovali jsme zdrojové kódy, schémata elektronických součástek a konstrukční díly robotické ruky.

Robotickou ruku tvoří z větší části tvrdý plast, měkčený je na bříškách prstů a na dlani. Na straně u palce se nachází micro USB vstup pro komunikaci s robotickou rukou přes počítač, pod ním pak čtyřpinový 3,5 mm Jack konektor pro vstup EMG snímače. Na konci malíkové hrany se nachází vstup pro napájení 12 V. Na hřbetě robotické ruky pod plastovým krytem je umístěna řídicí jednotka Chestnut. Pod ní jsou umístěny 4 servomotory, na které jsou navinuty provázky. Tyto pevné provázky prochází skrz ruku a prsty a upínají se na špičce každého prstu šroubkem. U prsteníku a malíku se tyto dva provázky následně spojují v jeden. Na hřbetě každého prstu se od špiček před řídicí jednotku upínají gumy podobné pružence, které při uvolnění prstu servomotorem navrátí prst do natažené polohy. Důležité je, aby každá guma měla přibližně stejnou pružnost. Flexe je totiž nucená pomocí servomotorů a extenze samovolná pomocí pruženky. U prsteníku jsme museli gumu upravit, jelikož na malíku byla více upnutá a prsteník se pak méně ochotně vracel na svou původní otevřenou polohu.

Vývojářský tým společnosti Open Bionics nabízí knihovnu spolu s programem Beetroot pro ovládání robotické ruky Brunel Hand. Program je kompatibilní s vývojovým prostředím Arduino IDE. Lze na něm kód číst, upravovat a následně kompilovat do konkrétní desky přes USB sériový port. Celou knihovnu s programem Beetroot můžeme nalézt na odkaze webové stránky GitHub (McBride, 2018).

Při analýze zdrojového kódu jsme objevili, že robotickou ruku můžeme ovládat přes sériový monitor. Každý prst se jmenuje písmenem F a doplňuje ho číslo, přičemž F0 je palec a F3 je prsteník s malíkem, jelikož tyto dva prsty ovládá jeden servomotor. Dalším znakem, který můžeme zadat robotické ruce je přesná pozice prstu písmenem P a opět doplněním čísla 0–100.

Pro každý prst lze také zvolit libovolná rychlost zadáním hodnoty od 0 do 255, neboli 8 bitů, 1 bajtu. Důležitým objevem pro nás byl fakt, že rychlost motoru je přímo úměrná reakční síle nějakého předmětu, který může ruka uchopit. Při menší rychlosti servomotoru se může projevit chyba, že se prst vůbec nepohne, jelikož gumy vyvolávají opačnou sílu pro návrat prstu a motor je slabý. Příčinou toho je zřejmě fakt, že rychlost pohybu je regulována změnou velikosti protékajícího proudu motory, což má však vliv i na výkon motoru. Změnu síly stisku můžeme ale považovat i za výhodu: když potřebuje uchopit nějaký měkký předmět, zpomalíme rychlost prstů a tím snížíme sílu stisku. Naopak pro pevný stisk použijeme největší rychlost.

Dále lze v sériovém monitoru zadat úchopové formy a gesta G0–G6.

## 3.4 Analýza výzkumných cílů a výzkumných otázek

### 3.4.1 Fungování a problematika robotické ruky Brunel Hand

Robotická ruka Brunel Hand pro flexi využívá 4 servomotorů, přičemž prsteník s malíkem sdílí 1 společný servomotor. K extenzi se využívají pasivní součástky, gumy z pruženky, které opačnou silou přitahují prst zpět do natažené polohy.

Při demontáži a analýze součástí Brunel Hand jsme zaznamenali několik technických nedostatků robotické ruky. Gumová pruženka je pro robotickou ruku vhodným, ale bohužel rychle stárnoucím materiálem. Jelikož se konkrétní robotická ruka, kterou jsme analyzovali, pohybuje na univerzitní půdě už několik let, pruženka chřadne a není tak pružná a při větším natažení začíná prskat. Na jednom z prstů, konkrétně na prsteníku, se už nacházela náhrada za originální pruženku, která však nebyla stejná jako ostatní a ve dvojici s malíkem vytvářela problémy s odlišnou reakční silou než u malíku a motor nepřítáhl tyto dva prsty stejně. Tato robotická ruka prošla zřejmě mnoha rukama univerzitních pracovníků a studentů v zájmu výzkumu, tudíž jsme nebyli rozhodně prvními, kdo robotickou ruku demontoval. O tom i svědčí výměna pruženky na prsteníku. Bohužel část šroubů na robotické ruce byla buď málo utažena, nebo se v daných místech vůbec nenacházela. Naštěstí to nemělo na funkci ruky vliv. Při snaze nastavení pruženky na palci jsme našli další nedostatek, tentokrát však výrobního rázu. Palec byl připevněn dvěma šrouby, které upevňovaly z jedné strany i pruženku. Nacházely se však pod gumovým plastem, který byl přilepen napevno a obtížně se demontoval. Po následném seřízení pruženky jsme ho opět museli pevně přilepit.

Novější verze 2.0 této robotické ruky se od předchozí verze, zdá se, poučila a některé tyto nedostatky vyřešila. Na její rozdíl od verze 1.0 se můžeme podívat na webu Open Bionics (Bionics, 2021b).



### 3.4.2 Řešení technických problémů

Brunel Hand vyžaduje trvale 12V zdroj napětí a jelikož nedisponujeme 12V baterií, musíme mít ruku stále připojenou ke vhodnému adaptéru do zásuvky. Po připojení zdrojového kabelu nám začne kontrolní dioda na mikrokontroléru skrz bílý plast blikat oranžovým světlem, což znamená, že je deska Chestnut připravena pro nahrání kódu. Po připojení USB a otevření sériového monitoru se světlo přemění na stále zelené a v tuto chvíli je deska připravena přijímat příkazy.

Při nahrávání kódu jsme však narazili na neočekávaný problém. Program Beetroot pro řízení Brunel Hand 1.0 od společnosti Open Bionics byl vytvořen v roce 2016 a naposledy byl aktualizován v roce 2018. Mezitím se také program upravil pro řízení následující robotické ruky 2.0, kterou Open Bionics vyvinuli. Vývojářské prostředí Arduino IDE však obdrželo mnoho aktualizací balíčků téměř každý měsíc až do dnešní doby. Po správném nainstalování programu Beetroot a příslušných knihoven podle postupu prostředí Arduino IDE nebylo schopné zkompileovat zdrojový kód, tudíž ani nešel žádný kód do Brunel Hand nahrát. Příčinu jsme našli ve výčtu chybových zpráv, přičemž se všechny chyby týkaly proměnné „SerialUSB“, konkrétní znění chyby bylo: „SerialUSB was not declared in this scope“. To znamená, že proměnná s názvem SerialUSB nebyla jednoznačně definována na začátku a tudíž program neví, o jakou proměnnou se jedná.

#### Úprava referencí v Beetroot

Chyba se poprvé projevila v oblasti referencí, což jsou příkazy, které se podílí na pre-processingu, neboli předzpracování kódu. Reference se odkazují komponenty mikrokontroléru, na ostatní knihovny a proměnné, čímž se snaží vytvářet přehlednější prostředí zdrojového kódu. Jelikož víme, o jakou desku se v robotické ruce jedná, a je nám jasné, že nebudeme využívat jinou (v referenci se zde uvažuje ještě další deska Arduino MEGA 2560), vyzkoušeli jsme upravit referenci pouze pro naši desku Chestnut (v kódu totožná s Arduino UNO). Tento krok nám však nepomohl a chybu neodstranil.

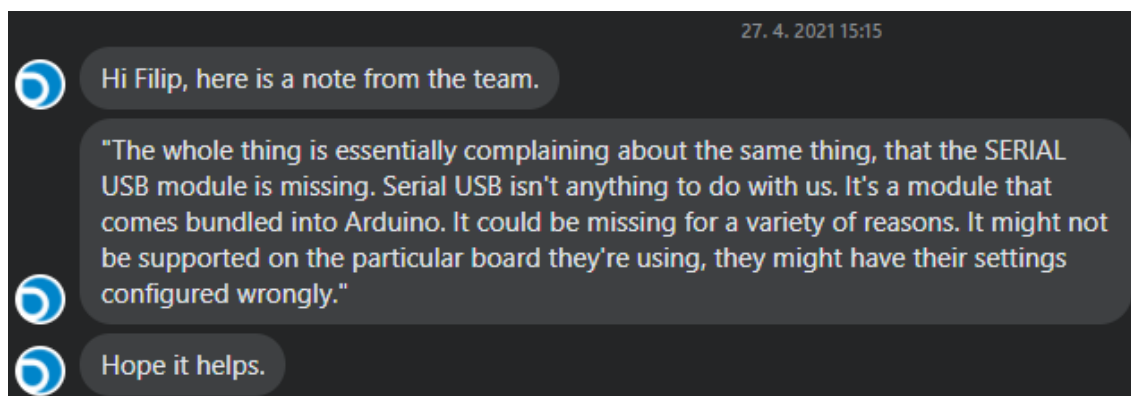
#### Instalace verze s datem vydání poslední aktualizace Beetroot

Další možností mohlo být přepsání kódu během aktualizací, kde se možná uvažují jiné vývojové desky než Chestnut, nebo je jinak definována proměnná „SerialUSB“. Provedli jsme další analýzu ohledně tohoto chybového hlášení a našli jsme, že se verze Beetroot 1.2.22 liší od verze 1.2.21 právě tím, že nedefinuje proměnnou „SerialUSB“. Rozhodli jsme se tedy přinstalovat vývojové prostředí s programem a knihovnami na nižší verzi vydanou v datu, které odpovídalo poslední zaznamenané aktualizaci od společnosti Open Bionics. Po tomto dalším neúspěchu jsme ještě vyzkoušeli všechny nejstarší prvotní verze, což nám také nepomohlo. Narozdíl od toho jsme si všimli, že tentokrát se už nejedná o chybu v oblasti proměnné „SerialUSB“, ale chybějící knihovny „sam.h“. tato knihovna však není v žádné verzi nikde k nalezení, ani na webu Open Bionics. Tuto cestu nalezení řešení jsme prozatím opustili.

## Kontaktování společnosti Open Bionics

Zřejmě se však opravdu jedná o nějakou chybu aktualizací softwaru. Napsat znovu celý zdrojový kód spolu s knihovnami, na čemž spolupracoval celý vývojářský tým Open Bionics, by bylo pro nás časově nepřijatelné a poté bychom touto bakalářskou prací směřovali spíše více k informačním technologiím, než ke zdravotnickým studiím.

Rozhodli jsme se tedy konzultovat tento problém přímo se společností Open Bionics. Dostali jsme tuto odpověď:



Obrázek 3.1: Zpráva od společnosti Open Bionics.

Ve zkratce nám společnost odpověděla, že vývojovému prostředí arduino IDE chybí sériový USB modul. Tvrdí, že sériové USB s nimi nemá nic společného a že je to modul, který je součástí Arduina, jenomže robotická ruka nevyužívá čistě Arduino, nýbrž jeho upravený typ Chestnut od společnosti Open Bionics. Chestnut by měl určitě být pro Beetroot podporovaný, jelikož pro něj byl speciálně navržen a konfigurace desky se také nejevila, jako hlavní příčina problému.

Tato odpověď nám příliš nepomohla z toho důvodu, že vývojová deska Chestnut byla právě vyvinuta společností Open Bionics a jak už jsme psali v teoretické části, Chestnut je jakýmsi klonem Arduino UNO a lze ji programovat ve vývojářském prostředí Arduino IDE. Nejedná se však o výrobek společnosti Arduino. Konkrétní nastavení a konfigurace desky pro propojení s počítačem přes USB, to vše je popsáno v postupu instalace programu Beetroot, jehož postup jsme několikrát pečlivě prostudovali a následovali.

## Instalace různých kombinací verzí

Naše snahy o nalezení řešení nekončily, právě naopak. I přesto, že tento problém velice posunul výzkum do neřešitelné časové tísně a řešení problému nebylo nikde k nalezení, rozhodli jsme se instalovat různé kombinace verzí knihoven, programů, desek a celého vývojového prostředí Arduino IDE, zdali nebudou některé verze kompatibilní. Toto řešení problému vzhledem k enormnímu množství aktualizací bylo jedno z nejvíce časově náročných, ale bohužel už jsme neměli jinou možnou alternativu řešení tohoto problému. Nakonec jsme našli řešení ve verzích Arduino IDE

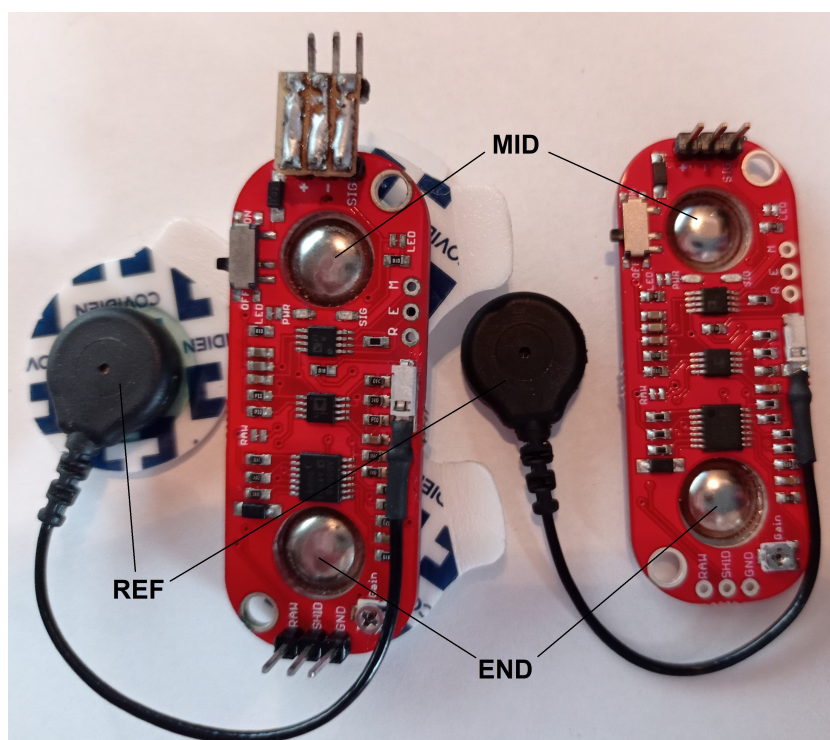
1.8.5, Open Bionics Boards 1.2.12, Arduino SAMD Boards 1.6.16, FingerLib 2.0.7. Museli jsme však předtím ještě pořídit starší verzi programu Beetroot 1.0.4. Konečně se podařilo úspěšně provést kompilaci a nahrát kód do Brunel Hand, ačkoliv to přineslo, jak už jsme říkali, velkou časovou ztrátu pro bakalářskou práci.

### 3.4.3 Úchopové formy Brunel Hand

V celé knihovně Beetroot se nachází mnoho složek, proto si podrobně popíšeme jen ty nejpodstatnější. Ve složkách s názvem *Grips* se nachází základní úchopové formy, kde je pro každý prst naprogramovaná poloha v dané definované pozici, lépe řečeno úrovni úchopu. Zdrojový kód jsme si pro své potřeby výzkumu přepsali. Podrobnosti zdrojového kódu můžeme nalézt v příloze.

### 3.4.4 MyoWare Muscle Sensor

V teoretické části v kapitole 2.7.1 jsme zmínili základní informace o tomto snímači, teď provedeme jeho hlubší analýzu. Na desce MyoWare jsou umístěny piny pro napájení, výstupní signál, výstupní surový signál a také pro externí připojení elektrod včetně referenční elektrody. Pro naše účely stačí pin pro napájení a signál. Dále zde jsou dvě LED diody – první zelená oznamuje, zdali je snímač napájen, a druhá červená nám znázorňuje intenzitu přijímaného svalového signálu.



Obrázek 3.2: EMG snímače MyoWare; MID – elektroda, která by měla být umístěna přibližně ve středu svalu, END – elektroda směřující k úponu svalu, REF – referenční elektroda.

Při snímání EMG signálu se surový signál usměrní a zesílí, abychom měli hodnoty větší nebo rovny nule. Dále se signál zintegruje, což nám vytvoří plynulejší průběh křivky signálu. Pokud požadujeme větší zesílení, můžeme ho nastavit pomocí šroubováku na vestavěném potenciometru umístěném na snímači.

Pro každý EMG snímač se požaduje co největší vstupní impedance, aby došlo k co nejmenším ztrátám na snímaném napětí. Vstupní impedance MyoWare je  $110\text{ G}\Omega$  (Advancer Technologies, 2015).

### 3.4.5 Řízení ruky pomocí povrchového EMG signálu

Pro řízení robotické ruky lze využít také EMG signálů, což je pro tuto bakalářskou práci nejpodstatnější způsob. Příkaz M1 nám aktivuje mód snímání jednoho kanálu z jednoho EMG snímače, M2 zpřístupní i další kanál, tudíž další EMG snímač. Brunel Hand má tedy možnost snímání dvou kanálů zároveň a odlišuje se tím od dalších robotických rukou pro výzkumné účely. Jelikož byla možnost zapůjčení dvou EMG snímačů MyoWare, využilo se tohoto módu M2. Další příkaz M3 nám povolí detailní rozpis každého vzorku signálu v obou snímačích, surový svalový signál (M) jeho prahovou hodnotu, což je dáno součtem hodnoty citlivosti a úrovně šumu (T), hodnotu šumu (N) a jestli je sval určen jako aktivní (1) nebo neaktivní (0). Regulaci zisku signálu provádíme pomocí integrovaného potenciometru. Změnu prahové hodnoty signálu pro určení aktivitu svalu provedeme například příkazem U600 pro hodnotu signálu 600. Tato hodnota nemá jednotky, jelikož se už jedná o analogově digitální převedený signál na hodnoty 0–1024. Při správném nastavení prahové hodnoty odpovídá uvolněnému svaly hodnota signálu 0–300, svaly v kontrakci pak hodnota 700–900. Příkazem M0 řízení pomocí EMG vypneme.

Jeden signál z EMG snímače robotická ruka používá pro flexi a druhý pro extenzi. Doba působení jednoho z těchto signálů má vliv na změnu úchopové formy a tento čas lze nastavit v sériovém monitoru například příkazem T100 pro čas 100 ms. Podrobnější informace o příkazech se můžeme dočíst v manuálu Open Bionics Labs (Open Bionics, 2016).

Pro použití jednoho nebo dvou EMG snímačů je nutné správné nastavení ve složce *EMGcontrol.h*. Pokud v případě dvou snímačů není jeden z nich zapojený, vstupní data obsahují hodně šumu a signál je nepoužitelný.

```

#ifndef EMG_CONTROL_H_
#define EMG_CONTROL_H_

#include "CircleBuff.h"
#include "TimerManagement.h"

#define NUM_EMG_CHANNELS 2
#define PRINT_MORE_EMG_DETAIL // uncomment this line to view more EMG details

#define NOISE_BUFFER_SIZE 128
#define BUFFER_DEFAULT_VAL 925

typedef enum _EMGMode
{
    EMG_OFF = 0, // EMG MODE NOT RUNNING
    EMG_SIMPLE, // SIMPLE EMG MODE
    EMG_PROPORTIONAL // PROPORTIONAL EMG MODE
} EMGMode;

```

Obrázek 3.3: Nastavení snímání z jednoho nebo ze dvou EMG snímačů ve složce *EMGcontrol.h*. Momentálně je nastaveno snímání z dvou kanálů. Dole vidíme módy snímání pro zadání do sériového monitoru (M0-M2): EMG\_OFF – M0 (vypnuto), EMG\_SIMPLE – M1 (jeden kanál), EMG\_Proportional – M2 (dva kanály).

## Výroba konektoru pro EMG snímač

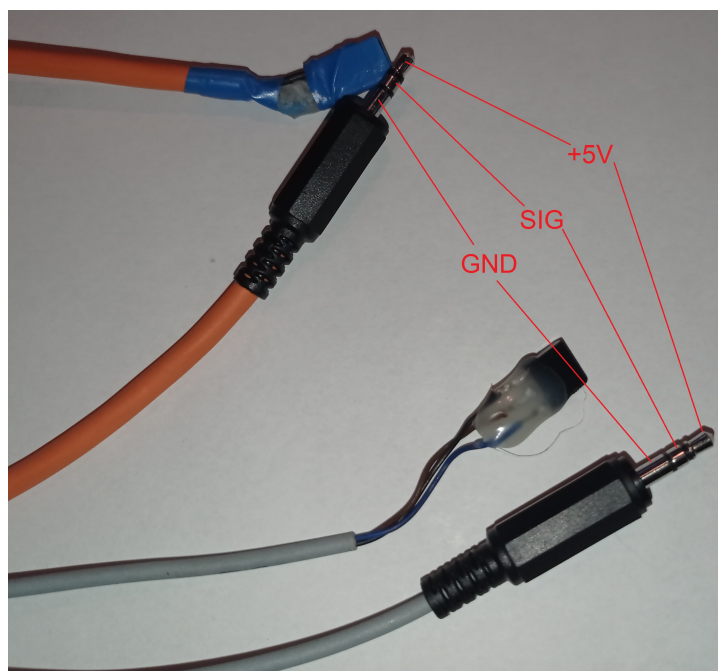
Jelikož má Brunel Hand použit jako vstup pro EMG snímač 4-pinový jack konektor, rozhodli jsme se použít rozbočovač na dva 3-pinové jacky, který se využívá v audio-systémech pro separované zapojení mikrofону a reproduktorů z jednoho 4-pinového vstupu. Neuvedomili jsme si však, že Brunel Hand má opět specifické rozložení jednotlivých pinů oproti zvukovému jacku. Konkrétně má 4-pinový audiojack konektor piny připojené v pořadí: left (v našem případě napájecí napětí), right (sluchátkový signál), ground (uzemnění) a mic (mikrofonní signál). Kdežto 4-pinový jack vstup na Brunel Hand má pořadí: napájecí napětí, první signál, druhý signál a uzemnění. Tudíž bylo zapotřebí si vyrobit vlastní rozbočovač, který můžeme vidět na obrázku 3.4. Abychom si byli jisti, že je na rozbočovači napětí, osadili jsme jack konektor ještě slabou LED diodou, která po připojení konektoru do robotické ruky pod napětím svítí červeně.

Propojení MyoWare a Brunel Hand jsme následně vyřešili elegantně pomocí 2 dalších jack konektorů, obsahujících každý 3 piny, propojených přes kabel na 3-pinový konektor ke snímači MyoWare. Oba dva jack konektory mají piny v pořadí: napájecí napětí, signál, uzemnění, viz obrázek 3.5. Díky tomuto zapojení nemusíme například při použití pouze jednoho snímače složitě a namáhavě přepájet kabeláž apod. Jednoduše nevyužitý vstup odpojíme a zapojíme signál pouze do prvního jack konektoru.





Obrázek 3.4: Rozbočovač ze 4-pinového jack konektoru na dva 3-pinové jack konektory; +5V–napájení, S1–signál prvního snímače, S2–signál druhého snímače, GND–uzemnění.



Obrázek 3.5: Kabeláž s 3-pinovým jack konektorem na jedné straně a se speciálním 3-pinovým konektorem na straně druhé pro připojení snímače. Signály (SIG) jsou spolu s napájením separované pro každý snímač.

### 3.4.6 Elektrody pro MyoWare

Před umístěním povrchových elektrod na kůži musí být nejprve zajištěno očištění kůže od nečistot a mastnoty, abychom svalový signál snímali co nejlépe. Elektrody se nejdříve připevní na MyoWare a s ním se poté přilepí na danou svalovou oblast. Ideálně by se měl snímač umístit na střed svalové skupiny, referenční elektroda pak blízko snímače do oblasti jiné svalové skupiny nebo okolní tkáně. Snímače umístíme na povrch oblasti svalů, které se podílí na ohýbání a natažení zápěstí. Při použití dvou snímačů se druhý snímač připevní ke svalu, který je antagonistou první svalové skupiny.

Svaly, které se účastní palmární flexe jsou hlavně zevní ohýbač zápěstí, vnitřní ohýbač zápěstí a dlouhý sval dlaňový. Jejich antagonisty pro dorsální flexi jsou dlouhý zevní natahovač zápěstí, krátký zevní natahovač zápěstí a vnitřní natahovač zápěstí. Pro flexi jsme snímali hlavně musculus palmaris longus a flexor carpi ulnaris, které se nachází vedle sebe na mediální straně předloktí. Pro extenzi jsme umístili snímač na proximálně–dorzální stranu předloktí.



Obrázek 3.6: Nalepovací povrchová elektroda model H124SG (TerniMed, 2021).

Jako povrchové elektrody lze použít obyčejné EKG elektrody na jedno použití se senzorem tvořeným sloučeninou chloridu stříbrného, zabudovaným v lepivém vodivém hydrogelu. Jedna elektroda stojí přibližně 3 Kč a pro jeden snímač MyoWare spotřebujeme 3 (TerniMed, 2021). Vyzkoušeli jsme opětovné použití těchto jednorázových elektrod, signál však byl velmi slabý a elektrody se daleko rychleji začaly odlepovat než při jejich prvním použití. Určitě by byla lepší možnost připojit na snímač elektrody, které by šly opětovně několikrát použít. Kabele jsme přitiskli k ruce gumičkou, protože měl snímač neustále tendenci se odlepovat.

### 3.4.7 Odezva řídicího systému na EMG signál

Mikroprocesor Atmel AMR M0+ SAMD21G18A na řídicí desce Chestnut pracuje na frekvenci od 48 MHz. Odezva řídicího systému závisí na rychlosti zpracování řídicí desky Chestnut, ale také rychlosti předzpracování signálu na snímači MyoWare. Celý systém na svalový potenciál reaguje velmi rychle a mohli bychom říci, že pracuje v reálném čase.

### 3.5 Diskuze

Po připojení se do vývojářského týmu Open Bionics, který je volně dostupný a každý se může registrovat, jsme objevili další články popisující stejný problém s kompilací a nedefinovanou proměnnou „SerialUSB“, viz zdroj (GitHub, 2020). Po zprovoznění naší robotické ruky jsme se rozhodli sdílet naše řešení do vývojářského týmu.

Jelikož se moderní výpočetní technologie rapidně vyvíjí, tato pouhých 5 let stará technologie bývá už pro moderní přístroje zastaralá a později i nekompatibilní. Použití moderních technologií ve zdravotnictví však požaduje legislativní a právní ošetření, což má za následek několikaleté zpoždění oproti nejmodernějším technologiím. Je tedy obtížné vytvářet moderní přístroje kompatibilní se staršími.

U demontáže jsme zaznamenali technické nedostatky po stránce údržbové, ale i výrobní. Pro správné fungování ruky potřebujeme také nezpuchřelé pruženky se stejnou pružností. Pro lepší přístup k úpravě palce by bylo vhodnější opatřit gumový plast na dlani kruhovými otvory pro šrouby, které připevňují palec a pruženku. Pravidelná demontáž je obtížná a časově náročná.

EMG snímač MyoWare se osvědčil jako efektivní, ale také trpí několika nedostatky. Při zapojení kabeláže má celý snímač tendenci se odlepit od ruky spolu s elektrodami. Bylo by vhodné opatřit snímač nějakou gumovou páskou, kterou bychom snímač okolo ruky více fixovali. Částečně jsme tento problém vyřešili gumíčkou kolem ruky. Jeho použití pro Brunel Hand je efektivní a dostačující.

Jednorázové povrchové elektrody se zdají být spolehlivými pro snímání svalových potenciálů pomocí snímače MyoWare. Pro experimentální použití je jejich cena zanedbatelná, avšak při komerčním použití by bylo vhodnější použít elektrody, které by šlo opětovně několikrát použít.

### 3.6 Návrh doporučení pro praxi

Řízení robotické ruky by mohlo být uskutečněno i jinou vývojovou deskou, i od společnosti Arduino. Naopak řízení specifickou deskou Chestnut od Open Bionics považujeme za přítěž, jelikož zde není jistá kompatibilita a funkčnost, jak jsme sami zjistili. Univerzálnější desky jsou pak mnohdy cenově přijatelnější, jejich software má větší podporu aktualizací a mohou pak být mezi uživateli rozšířenější.

Ve zdravotnictví je rozhodně na místě lepší kompatibilita s ostatními technologiemi a záruka podpory aktualizací. Nemocnice si nemohou dovolit používat velmi drahý přístroj jen několik let pouze z důvodu nepodporování nového softwaru nebo špatné kompatibility. Proto je určité na místě vytvářet hybridní verze softwaru určené pro starší, ale už i modernější přístroje na úkor například staršího uživatelského rozhraní programu.

Co se týče vstupního konektoru pro EMG snímač, rozhodně by bylo jednodušší řídit se opět univerzálnějšími postupy pro větší kompatibilitu připojení. Kdyby měl 4-pinový jack konektor v robotické ruce stejné provedení jako audio jack, usnadnilo by to její používání a také část práce pro sestavení řídicího systému.



Jednorázové povrchové elektrody rozhodně nejsou správné ekologické ani ekonomické řešení a vzhledem k dalším odpadům, které lidská společnost vyprodukuje, by rozhodně přišla vhod inovace s použitím elektrod na více než jedno použití. Jiné povrchové elektrody (balónkové, klešťové apod.) jsou příliš zastaralé nebo nejsou pro robotickou ruku vhodné.

## 4 Závěr

Seznámili jsme se s fungováním a problematikou robotické ruky Brunel Hand. Byla vytvořena pomocí 3D tisku a dále obsahovala 4 servomotory, řídicí jednotku, pruženku, provázek a spojovací materiál. Brunel Hand verze 1.0 trpěla ještě mnoha nedostatky, konkrétně konstrukčními chybami pro demontáž a možnost úpravy jednotlivých prstů. Brunel Hand také potřebovala specifický čtyřpinový jack konektor a nešlo ho zaměnit s audio konektorem, o což jsme se pro usnadnění pokoušeli. Celý systém připojení EMG snímačů bylo nutné speciálně uzpůsobit, abychom dosáhli spolehlivého připojení bez šumu.

Zanalyzovali jsme zdrojový kód a algoritmus řídicí desky. Použili jsme vhodnou verzi programu a knihovnu pro robotickou ruku Brunel Hand. Zjistili jsme problémy týkající se kompatibility řídicí desky Chestnut. Zdá se, že deska už nebyla příliš v zájmu společnosti Open Bionics, a tudíž už nebyl zdrojový kód delší čas aktualizován a opraven pro správné fungování Brunel Hand. Nejvhodnější cestou pro řešení efektivního rozvoje robotických rukou by bylo určitě univerzální prostředí a snaha o nejlepší kompatibilitu a optimalizaci. Dokázali jsme nahrát zdrojový kód do robotické ruky a naprogramovat ji. Otestovali a naprogramovali jsme možnost řízení robotické ruky přes sériový monitor pomocí připojení USB do počítače. S použitím sériového monitoru jsme mohli využívat základní příkazy pro ovládání robotické ruky. V sériovém monitoru jsme mohli pracovat s každým servomotorem zvlášť, přičemž každý prst ovládal jeden servomotor, kromě prsteníku a malíku, které spolu sdíleli jeden servomotor dohromady.

Zanalyzovali jsme různé úchopové formy a naprogramovali úchopové formy do robotické ruky Brunel Hand. Robotická ruka nabízela možnost změny polohy prstu a jeho rychlosti pohybu, která měla velký vliv na sílu stisku prstu. O každém prstu jsme mohli nalézt záznam rychlosti pohybu a pozici, ve které se prst nachází.

Zprovoznili jsme řízení robotické ruky Brunel Hand pomocí povrchového EMG signálu za použití snímačů MyoWare pro jeden i dva kanály. Pro jeden kanál robotická ruka reagovala pouze na flexi zápěstí, respektive na signál vznikající změnou elektrického potenciálu ve svalové skupině, která se podílí na ohýbání zápěstí. Řídicí systém reaguje na snímaný EMG signál téměř okamžitě a můžeme tedy tvrdit, že pracuje v reálném čase. Jednorázové povrchové EKG elektrody se zdají být pro výzkum vhodné, avšak pro každodenní použití robotické ruky by byl rozhodně vhodnější jiný typ povrchových elektrod, které by však také dobře přiléhaly na kůži a byly pro člověka při užívání robotické ruky pohodlné.

Při stanovení výzkumu jsme nemohli bez znalostí dané problematiky jednoznačně určit časovou náročnost a dobu potřebnou pro splnění všech cílů. Také nešlo s jis-

totou říci, jaké vnější vlivy bakalářskou práci ovlivní. Z tohoto důvodu se výzkum bakalářské práce prodloužil, nicméně jsme našli řešení. Zjistili jsme, že s nesmírně rychlým vývojem moderních technologií už můžeme považovat technologie starší než 5 let za zastaralé, jelikož bez kompatibility a spolehlivé funkčnosti jsou zbytečné. Pro pacienta s amputací končetiny by však bylo nepřijatelné každých 5 let vyměnit nekompatibilní robotickou končetinu za novou.

## Použitá literatura

- ADVANCER TECHNOLOGIES, 2015. *3-lead Muscle / Electromyography Sensor for Microcontroller Applications: Myoware Muscle Sensor* [online] [cit. 2021]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MyowareUserManualAT-04-001.pdf>.
- ADVANCER TECHNOLOGIES, 2016. *Myoware Muscle Sensor* [online] [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: [www.advancertechnologies.com/p/myoware.html](http://www.advancertechnologies.com/p/myoware.html).
- BIONICS, Open, 2016. *Ada V1.1 Assembly Instructions* [online] [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://openbionicslabs.com/obtutorials/ada-v1-assembly>.
- BIONICS, Open, 2021a. *Hero Arm* [online] [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://openbionics.com/hero-arm/>.
- BIONICS, Open, b. *Brunel Hand 2.0* [online] [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://openbionicslabs.com/shop/brunel-hand>.
- BRAIN ROBOTICS. *Brain Robotics Hand* [online] [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: [www.brainrobotics.com/brainrobotics-hand/](http://www.brainrobotics.com/brainrobotics-hand/).
- ČIHÁK, Radomír, 2011. *Anatomie 1*. Třetí, upravené a doplněné vydání. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-3817-8.
- DUHIG, Holly, 2018. *Bionic Limbs: Science Fiction to Science Fact*. 2. vyd. New York: Gareth Stevens Publishing. ISBN 978-1-5382-1381-0.
- DUNGL, Pavel et al, 2014. *Ortopedie: Druhé přepracované a doplněné vydání*. 2. vyd. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-9337-5.
- EDWARDS, Scott G. a Vinod K. PANCHBHAVI, 2019. *Elbow and Above-Elbow Amputations* [online] [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: [emedicine.medscape.com/article/1237886-overview%5C#a4](http://emedicine.medscape.com/article/1237886-overview%5C#a4).
- EXIII, 2015. *HACKberry: 3D-printable open-source bionic arm* [online]. Japan: Exiii [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: [exiii-hackberry.com](http://exiii-hackberry.com).
- FLOYD, R.T. a Clem W. THOMPSON, 2015. *Manual of structural kinesiology*. 19. vyd. New York: McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-336929-7.
- GITHUB, 2020. *SerialUSBúas not declared in this scope #19* [online] [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://github.com/Open-Bionics/Beetroot/issues/19>.
- HADRABA, Ivan, 2001a. Úchop v protetice (1.část). *Ortopedická protetika* [online]. Roč. 4, č. 6, s. 14–18 [cit. 2020-10-24]. ISSN 1212-6705. Dostupné z: [www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc8a7b70693248.htm](http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc8a7b70693248.htm).

- HADRABA, Ivan, 2001b. Úchop v protetice (2. část). *Ortopedická protetika*. Roč. 4, č. 7, s. 26–32. ISSN 1212-6705. Dostupné také z: [www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc8a7b70693248.htm](http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc8a7b70693248.htm).
- HASSAN, Hussein F., Sadiq J. ABOU-LOUKH a Ibraheem Kasim IBRAHEEM, 2019. Teleoperated robotic arm movement using electromyography signal with wearable Myo armband. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. ISSN 1018-3639. Dostupné z DOI: [10.1016/j.jksues.2019.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.05.001).
- KITTNAR, Otomar, 2020. *Lékařská fyziologie*. 2. vyd. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-1063-4.
- KOPRNICKÝ, Jan, 2020. *Laboratoř bionických rukou* [online]. Liberec [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: [www.fm.tul.cz/ustavy/ustav-mechatroniky-a-technicke-informatiky/veda-a-vyzkum/laborator-bionickych-rukou](http://www.fm.tul.cz/ustavy/ustav-mechatroniky-a-technicke-informatiky/veda-a-vyzkum/laborator-bionickych-rukou).
- KOPRNICKÝ, Jan, Petr NAJMAN a Jiří ŠAFKA, 2017. 3D printed bionic prosthetic hands. *2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)* [online]. Roč. 2017, s. 1–6 [cit. 2021-03-30]. ISSN 978-1-5090-5582-1. Dostupné z DOI: [10.1109/ECMSM.2017.7945898](https://doi.org/10.1109/ECMSM.2017.7945898).
- KOUDELA, Karel, 2004. *Ortopedie*. 1. vyd. Praha: Karolinum. ISBN 80-246-0654-2.
- MCBRIDE, Olly, 2018. *Github: Beetroot* [online] [cit. 2020]. Dostupné z: <https://github.com/Open-Bionics/Beetroot>.
- NAJMAN, Petr, 2017. *Bionická ruka*. Liberec. Diplomová práce. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci.
- NATIONAL CANCER INSTITUTE. *Structure of Skeletal Muscle* [online] [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://training.seer.cancer.gov/anatomy/muscular/structure.html>.
- OPEN BIONICS, 2016. *Open Bionics Labs: Muscle control v1.2* [online] [cit. 2021]. Dostupné z: <https://openbionicslabs.com/obtutorials/muscle-control-v1-2>.
- OPEN BIONICS, 2020. *Open Bionics Labs* [online] [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: [openbionicslabs.com](http://openbionicslabs.com).
- OPEN BIONICS, 2021a. *Official custom-made Deus Ex Covers for the Hero Arm* [online] [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: [shop.openbionics.com/products/deus-ex-covers](http://shop.openbionics.com/products/deus-ex-covers).
- OPEN BIONICS, b. *Robotic Hand Development Board: Chestnut board datasheet* [online] [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: [github.com/Open-Bionics/Chestnut\\_PCB/blob/master/Chestnut%5C%20Board%5C%20Data%5C%20Sheet.pdf](https://github.com/Open-Bionics/Chestnut_PCB/blob/master/Chestnut%5C%20Board%5C%20Data%5C%20Sheet.pdf).
- ÖSSUR, 2019. *Prosthetic solutions catalog: Upper extremity* [online] [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://assets.ossur.com/library/37824>.
- ÖSSUR, a. *i-Digits Access* [online] [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: [www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-digits-access?tab=specification](http://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-digits-access?tab=specification).

- ÖSSUR, b. *i-Limb Ultra titan* [online] [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: [www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb-ultra-titanium](http://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb-ultra-titanium).
- OTTOBOCK, 2019. *13E200 MyoBock electrode* [online] [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://professionals.ottobock.com.au/Products/Prosthetics/Prosthetics-Upper-Limb/Adult-Terminal-Devices/13E200-MyoBock-electrode/p/13E200>.
- OTTOBOCK, 2021a. *Body-powered pažní tahová protéza* [online] [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: [www.ottobock.cz/protetika/horni-koncetiny/prehled-vybaveni/tahov%C3%A9-prot%C3%A9zy-body-powered](http://www.ottobock.cz/protetika/horni-koncetiny/prehled-vybaveni/tahov%C3%A9-prot%C3%A9zy-body-powered).
- OTTOBOCK., 2021b [online] [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: [www.ottobock.com](http://www.ottobock.com).
- OTTOBOCK., 2021c. *Bebionic: Přirozený pohyb pro moderní dobu*. Zruč-Senec. Dostupné také z: [www.ottobock.cz/media/horn%C3%AD-kon%C4%8Detiny/bebionic/bebionic-bro%C5%BEura-pro-protetiky.pdf](http://www.ottobock.cz/media/horn%C3%AD-kon%C4%8Detiny/bebionic/bebionic-bro%C5%BEura-pro-protetiky.pdf).
- OTTOBOCK., 2021d. *Bebionic Hand* [online] [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: [www.ottobock.cz/protetika/horni-koncetiny/prehled-vybaveni/prosthetics\\_upper\\_limb\\_solution\\_bebionic\\_hand\\_1-contentupdate](http://www.ottobock.cz/protetika/horni-koncetiny/prehled-vybaveni/prosthetics_upper_limb_solution_bebionic_hand_1-contentupdate).
- OTTOBOCK., e. *Protézový systém AxonBus s rukou Michelangelo* [online] [cit. 2021]. Dostupné z: [www.ottobock.cz/protetika/horni-koncetiny/prehled-vybaveni/system-axonbus-a-michelangelo](http://www.ottobock.cz/protetika/horni-koncetiny/prehled-vybaveni/system-axonbus-a-michelangelo).
- SELECKÝ, Matúš, 2016. *Arduino*. 1. vyd. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-4840-2.
- SIMONS, M. Humanoid robotic hand: Open Bionics [online], s. 7 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: [static1.squarespace.com/static/56376cfde4b078ea32822fff/t/5b39eed11ae6cf7909b8a51c/1530523347117/Brunel%20BV.10%202BDatasheet.pdf](https://static1.squarespace.com/static/56376cfde4b078ea32822fff/t/5b39eed11ae6cf7909b8a51c/1530523347117/Brunel%20BV.10%202BDatasheet.pdf).
- SOSNA, Antonín et al., 2001. *Základy ortopedie*. 1. vyd. Praha: Triton. ISBN 80-7254-202-8.
- STUDIO, Latest Open Tech From Seed. *What is EMG sensor, Myoware and How to use with Arduino?* [online] [cit. 2021-06-29]. Dostupné z: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/27/what-is-emg-sensor-myoware-and-how-to-use-with-arduino/>.
- TERNIMED. *EKG elektrody, Ø 24 mm Model: H124SG (Kendall)* [online] [cit. 2021-06-16]. Dostupné z: <https://www.ternimed.de/ECG-electrodes-O-24-mm-Model-H124SG-Kendall>.
- VAŘEČKA, Martin, 2016. *Aktivní protéza ruky*. Brno. bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- VILLARREAL, Mariana Ruiz, 2001. *Human arm bones diagram* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: [upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Human\\_arm\\_bones\\_diagram.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Human_arm_bones_diagram.svg).

- WEISS, Jay, Lyn WEISS a Julie SILVER, 2016. *Easy EMG: A Guide to Performing Nerve Conduction Studies and Electromyography*. 2nd Edition. London: Elsevier. ISBN 978-0-323-28664-0. Dostupné také z: [www.elsevier.com/books/easy-emg/weiss/978-0-323-28664-0](http://www.elsevier.com/books/easy-emg/weiss/978-0-323-28664-0).
- WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, 2005. *Action potencial* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: [upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/Action\\_potential\\_vert.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/Action_potential_vert.png).

## A Obsah přiloženého CD

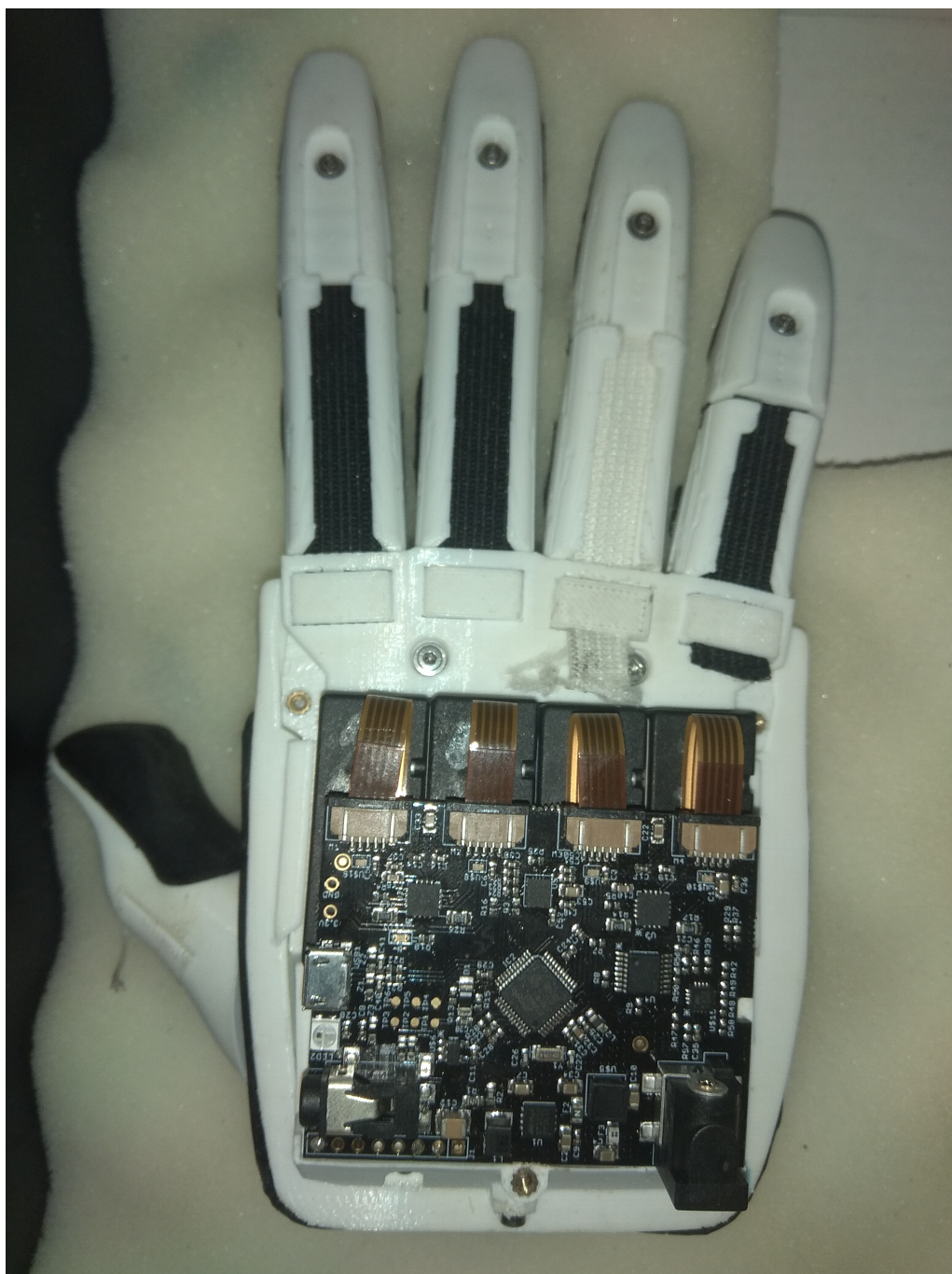
- Kopie zadání bakalářské práce
- Text bakalářské práce
- technická dokumentace řídicí desky Chestnut a EMG snímače MyoWare
- Použité obrázky
- Fotodokumentace
- Program Beetroot se zdrojovým kódem



## B Detailní fotodokumentace demontáže Brunel Hand

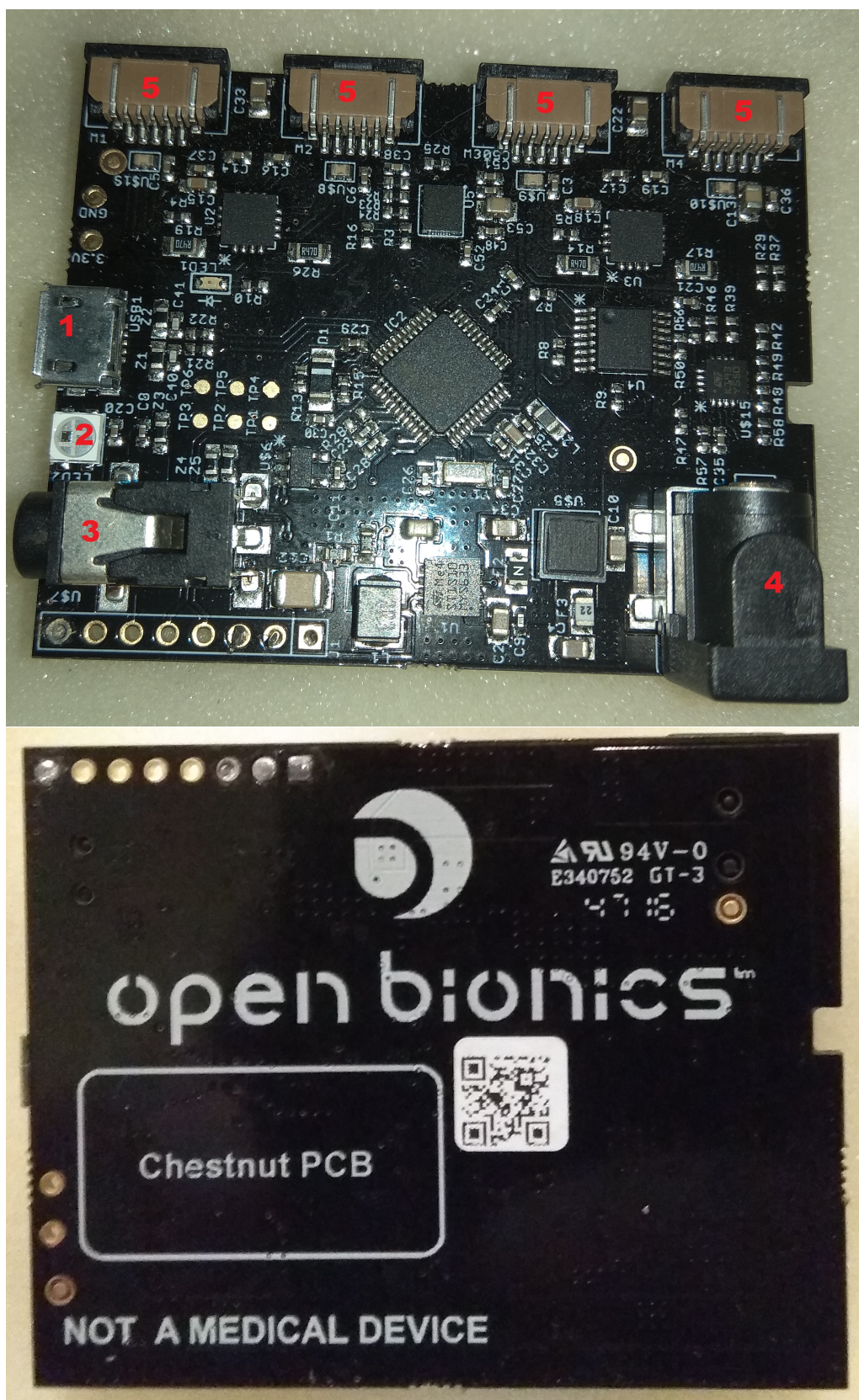


Obrázek B.1: Brunel Hand 1.0



Obrázek B.2: Demontáž vrchního krytu ruky a krytů pruženek na prstech





Obrázek B.3: Řídicí jednotka Chestnut od společnosti Open Bionics; 1 – Micro USB konektor, 2 – signalizující RGB LED dioda, 3 – čtyřpinový jack konektor, 4 – konektor napájení mikrokontroléru, 5 – připojení pro servomotory



Obrázek B.4: Servomotory pod řídicí jednotkou. Zde vidíme uchycení provázků a speciální ohebné vodiče.





Obrázek B.5: Uchycení provázku a pruženky na prstu. Provázek lze nastavit utažením do šroubu, pruženka se upravuje demontáží plastové součástky uvnitř a následným zacvaknutím.



Obrázek B.6: Pogumování dlaně ruky. Zde lze vidět pouze jeden přístupný šroub, který upevňuje palec ruky.



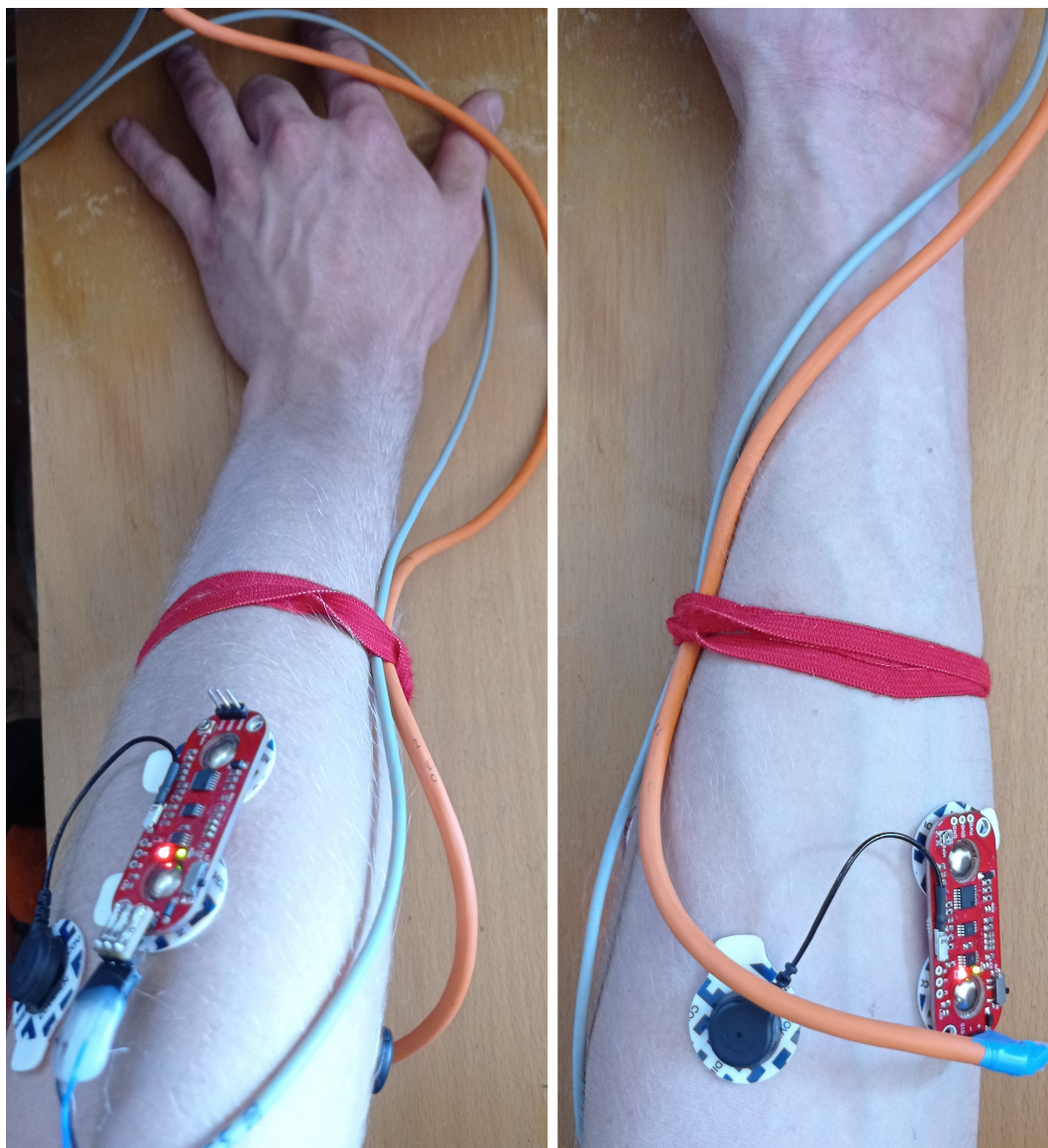
Obrázek B.7: Demontovaná guma z dlaně ruky. Na tomto obrázku už vidíme i druhý šroub.





Obrázek B.8: Umístění pruženky na palci a její uchycení

## C Připevnění EMG snímačů MyoWare



Obrázek C.1: Umístění snímačů MyoWare s povrchovými elektrodami a kabeláží. Gumičkou kolem ruky jsme si upevnili kabeláž, aby se snímače s elektrodami neodlepovaly.



## D Zdrojový kód z programu Beetroot

```
#if defined(ARDUINO_AVR_MEGA2560) || defined(ARDUINO_AVR_UNO)
#define MYSERIAL Serial
#define SERIALNONBLOCKCHECK      (1)
#elif defined(ARDUINO_ARCH_SAMD)
#if defined(SERIAL_USB_CONTROL)
#define MYSERIAL SerialUSB
#define SERIALNONBLOCKCHECK      (MYSERIAL.dtr())
#elif defined(SERIAL_PINS_CONTROL)
#define MYSERIAL SerialPins
#define SERIALNONBLOCKCHECK      (1)
#elif defined(SERIAL_JACK_CONTROL)
#define MYSERIAL SerialJack
#define SERIALNONBLOCKCHECK      (1)
#else
#define MYSERIAL SerialUSB // default to SerialUSB control
#define SERIALNONBLOCKCHECK      (MYSERIAL.dtr())
#endif
#else
#error "Board not supported. Serial not able to be configured"
#endif
```

```
'SerialUSB' was not declared in this scope
#define SERIALNONBLOCKCHECK      (MYSERIAL.dtr())
      ^
sketch\Utils.h:77:6: note: in expansion of macro 'SERIALNONBLOCKCHECK'
  if( SERIALNONBLOCKCHECK )
    ^
exit status 1
'SerialUSB' was not declared in this scope
```

Obrázek D.1: Chybové hlášení se zvýrazněním začínajícím chybovým řádkem v knihovně *Utils.h*

```

{ // PEST
  //COUNT  F0          F1          F2          F3 & F4
  { 0,      FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN }, //OPEN
  { 2,      BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTA
  { 20,     BLANK,      FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN }, //MIDPOINTB
  { 40,     500,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTC
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTD
  { 100,    800,      FULLY_CLOSED, FULLY_CLOSED, 850 },    //CLOSED
},
{ // HAKOVY UCHOP
  //COUNT  F0          F1          F2          F3 & F4
  { 0,      FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN }, //OPEN
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTA
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTB
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTC
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTD
  { 100,    FULLY_OPEN,  FULLY_CLOSED, FULLY_CLOSED, 850 },    //CLOSED
},
{ // UKAZOVAK
  //COUNT  F0          F1          F2          F3 & F4
  { 0,      800,      FULLY_OPEN,  FULLY_CLOSED, 850 },    //OPEN
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTA
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTB
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTC
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTD
  { 100,    800,      FULLY_CLOSED, FULLY_CLOSED, 850 },    //CLOSED
},
{ // PINZETOVY UCHOP
  //COUNT  F0          F1          F2          F3 & F4
  { 0,      FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN }, //OPEN
  { 20,     OPPOSE_PINCH, BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTA
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTB
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTC
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTD
  { 100,    OPPOSE_PINCH, FULLY_CLOSED, FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN }, //CLOSED
},
{ // SPETKOVY UCHOP
  //COUNT  F0          F1          F2          F3 & F4
  { 0,      FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN,  FULLY_OPEN }, //OPEN
  { 20,     OPPOSE_TRIPOD, BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTA
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTB
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTC
  { BLANK,  BLANK,      BLANK,      BLANK,      BLANK },    //MIDPOINTD
  { 100,    OPPOSE_TRIPOD, FULLY_CLOSED, FULLY_CLOSED, FULLY_OPEN }, //CLOSED
}

```

Obrázek D.2: Upravený zdrojový kód ze složky *Grips\_Default.cpp*; BLANK — zachovává stávající stav, FULLY\_OPEN — maximální otevření ruky, FULLY\_CLOSED — maximální uzavření ruky, ostatní polohy jsou specifické pro daný úchop a lze je nalézt v knihovně *FingerLib.h*.